

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

**Vlastnosti popílků z úložiště Předmostí a možnost jejich  
zabudování do zemního tělesa dálnice v úseku Přerov – Lipník  
nad Bečvou**

**The Properties of the Fly Ash from Předmostí Dump and the  
Possibility of Its Utilization as Fill in the D1 Motorway in the  
Section Přerov – Lipník nad Bečvou**

Student:

Martin Rochovanský

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta

Ostrava 2016

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Rochovanský**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: Vlastnosti popílků z úložiště Předmostí a možnost jejich zabudování do zemního tělesa dálnice v úseku Přerov-Lipník nad Bečvou  
The Properties of the Fly Ash from Předmostí Dump and the Possibility of Their Utilization as Fill in the D1 Motorway in the Section Přerov-Lipník nad Bečvou

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod (předtím abstrakt (česky, anglicky), definice řešené problematiky)
2. Popílký a jejich vlastnosti (mineralogické, chemické, fyzikálně-mechanické)
3. Průkazní zkoušky popílků v rozsahu dle TP93
4. Ověření, zda se vlastnosti popílků mění v závislosti na hloubce a místě uložení
5. Vyhodnocení zhutňovacích zkoušek popílků bez úpravy a po úpravě a místě uložení
6. Závěry a doporučení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] FEČKO, P. et al. *Popílký*. VŠB-TU Ostrava. Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0327-5
- [2] KRESTA, F. *Druhotné suroviny v dopravním stavitelství*. VŠB-TU Ostrava. Ostrava, 2012. s. 114, obr. 36, anglický souhrn. ISBN 978-80-248-2890-9
- [3] KRESTA, F. *Popílký z úložišť Předmostí a Prosenice – potenciální zdroj materiálu pro stavbu dálnice D1 v úseku Přerov – Lipník nad Bečvou*. Konference Popílký ve stavebnictví 2015. Brno, 2012. ISBN 978-80-214-5192-6
- [4] SEAR, L.K.A. *Properties and use of coal fly ash*. Thomas Telford Publishing. London, 2001. ISBN 0-7277-3015-0
- [5] SHERWOOD, P.T. *Alternative materials in road construction*. Thomas Telford Publishing. London, 2001. ISBN 0-7277-3031-2
- [6] ČSN 72 1006. *Kontrola zhutnění zemin a sypanin*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 52 s.
- [7] TP 93. *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2011. 31 s.
- [8] TP 94. *Úprava zemin*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2013. 52 s.
- [9] TKP 4. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací. Kapitola 4: Zemní práce*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2009. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016



---

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 29. 11. 2016

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 29. 11. 2016

.....

Podpis studenta

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi a využitelností popílků z úložiště Předmostí v zemním tělese dálnice D1 na úseku Přerov – Lipník nad Bečvou. Popílký pocházejí z Přerovské teplárny a následně byly uloženy na deponii Předmostí. Ukládání těchto popílků skončilo asi před dvaceti lety. V úvodu se práce zabývá problematikou popílků obecně a jejich klasifikací. Další část této diplomové práce se věnuje výzkumu vlastností popílků na mnou odebraných vzorcích. Na těchto vzorcích byly provedeny všechny průkazní zkoušky, které jsou uvedeny v TP 93 – Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů. První část výzkumu se zabývá popílký jako násypovým materiálem. Druhá část řeší popílký jako pojivo. Zjištěné výsledky byly porovnány s požadavky, které jsou uvedeny v TP 93. V závěru práce jsou formulována doporučení, zda lze tyto popílký zabudovat do zemního tělesa pozemních komunikací samotně, popřípadě jestli se musí mísit s pojivy (cement, vápno).

## **Klíčová slova:**

Popílký, fyzikální vlastnosti, chemické vlastnosti, zemní těleso, laboratorní zkoušky.

## **Abstract**

This thesis deals with the properties and utilisation of fly ash from the Předmostí tip as fill in the D1 motorway in the section Přerov – Lipník nad Bečvou. Fly ash was produced in the heating plant Přerov and subsequently stored in the Předmostí tip. Deposition of fly ash finished twenty years ago. Introduction contains basic information regarding origin of coal combustion products (including fly ash) and their classification. Next part of thesis deals with research of the fly ash samples taken by myself. Tests were carried to the requirements of the technical regulation TP 93 - Design and implementation of road constructions utilizing fly ash and ash. The first part of the research deals with ashes as fill. The next part discussed utilization of fly ash as binder component. The observed results were compared with the limit values of TP 93. Finally, there were recommendations concerning fly ash utilisation in road construction as fill, or as a component of binder.

## **Key words:**

Fly ash, mechanical properties, chemical properties, fill, laboratory tests.

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Vznik a vlastnosti popílků .....	11
2.1	Kvalita používaného uhlí .....	11
2.2	Technologie spalování uhlí .....	11
2.2.1	Roštová ohniště.....	11
2.2.2	Prášková ohniště .....	12
2.2.3	Fluidní ohniště .....	13
2.3	Vlastnosti popílků .....	13
2.3.1	Mineralogické složení popílků.....	13
2.3.2	Chemické složení popílků.....	14
2.3.3	Fyzikálně- mechanické vlastnosti popílků.....	14
2.4	Klasifikace popílků .....	15
2.4.1	Návrh mezinárodního klasifikačního systému.....	15
2.4.2	Klasifikace dle ASTM C 618.....	16
2.4.3	Klasifikace dle CSA. A23.....	16
2.4.4	Klasifikace popílků dle zdroje spalovaného uhlí.....	17
2.4.5	Klasifikace popílků podle obsahu CaO .....	17
2.4.6	Klasifikace popílků dle vápenného indexu.....	17
2.4.7	Navrhovaná klasifikace popílků .....	17
3	Využití popílků ve stavebnictví.....	19
3.1	Využití popílků ve výrobě stavebních materiálů .....	19
3.1.1	Výroba umělých lehčených, lehkých a hutních kameniv .....	20
3.1.2	Výroba betonu.....	20
3.1.3	Výroba pórobetonu nebo pěnobetonu.....	20
3.1.4	Výroba maltovin a omítkových směsí .....	21
3.1.5	Výroba keramiky .....	21
3.1.6	Výroba cementu.....	21
3.2	Využití popílků v dolech.....	21
3.3	Využití popílků v dopravním stavitelství.....	22
4	Průkazní zkoušky dle TP93 .....	24



4.1	Zrnitost – Prosévací zkouška .....	24
4.2	Zkouška Proctor standard.....	26
4.3	Pórovitost .....	29
4.4	Kalifornský poměr únosnosti CBR.....	30
4.5	Objemové změny .....	32
4.6	Analýza výluhu .....	33
5	Ověření vlastností popílků.....	35
5.1	Zdroj popílků na úložišti Předmostí – Přerovská teplárna.....	37
5.1.1	Historie teplárny .....	37
5.1.2	Technologie spalování uhlí v teplárně Přerov .....	38
5.1.3	Spalovaný materiál v teplárně Přerov .....	38
5.2	Popílek jako násypový materiál .....	38
5.2.1	Chemický rozbor.....	38
5.2.2	Zrnitost.....	39
5.2.3	Proctorova zkouška.....	41
5.2.4	Zkouška CBR.....	42
5.2.5	Lineární bobtnání.....	43
5.2.6	Pórovitost.....	44
5.2.7	Analýza výluhů .....	44
5.3	Popílek jako pojivo .....	44
5.3.1	Zatřídění jílu .....	45
5.3.2	Vytvoření směsí .....	45
5.3.3	Proctor standard .....	45
5.3.4	Zkouška CBR.....	47
5.3.5	Objemové změny .....	51
5.4	Souhrn výsledků.....	51
6	Porovnání výsledků s technickými předpisy .....	55
6.1	Porovnání s TP 93 .....	55
6.2	Porovnání výsledků s německým předpisem .....	55
7	Závěr.....	56
8	Seznam použité literatury .....	58

9	Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	61
---	--------------------------------------	----

## SEZNAM ZNAČENÍ:

### Velká písmena latinské abecedy

Zi	Procentuální podíl z celkové navážky	[%]
Mi	Hmotnost jednotlivého propadu sít	[kg]
M	Celková hmotnost navážky	[kg]
V	Objem válce	[m <sup>3</sup> ]
F	Síla potřebná k zatlačení trnu konstantní rychlostí do předem stanovené hloubky zeminy	[KN]
Fs	Síla potřebná k zatlačení trnu konstantní rychlostí do předem stanovené hloubky normového kameniva	[KN]

### Malá písmena latinské abecedy

m <sub>w</sub>	Potřebné množství vody	[l]
w <sub>p</sub>	Požadovaná vlhkost	[%]
m <sub>s</sub>	Hmotnost vzorku zeminy	[g]
m	Hmotnost zeminy ve válci	[g]
w	Vlhkost zeminy	[%]
w <sub>opt</sub>	Optimální vlhkost zeminy	[%]
w <sub>l</sub>	Mez tekutosti	[%]
w <sub>p</sub>	Mez plasticity	[%]
I <sub>p</sub>	Index plasticity	[ - ]
m <sub>v</sub>	Vodní hodnota pyknometru	[g]
n	Pórovitost	[%]
k <sub>f</sub>	Koeficient filtrace	[m. s <sup>-1</sup> ]

### Řecká abeceda

ρ <sub>d</sub>	objemová hmotnost suché zeminy	[kg. m <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	Měrná hmotnost zeminy	[g. m <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>v</sub>	Měrná hmotnost vody při teplotě 20 °C	[g. m <sup>-3</sup> ]

# 1 Úvod

V Evropské unii se každým rokem vyprodukuje asi 100 miliónů tun vedlejších energetických produktů. Česká republika sama vyprodukuje asi 10 miliónů tun těchto surovin. Naše republika je v tomto ohledu vysoce nad evropským průměrem. Protože ukládání do různých deponií není nejvhodnější variantou zpracování tohoto materiálu, je vhodné tyto suroviny využít ve stavebnictví. Pro využití těchto surovin je nutné znát jejich fyzikálně – mechanické a chemické vlastnosti. Hlavní výhoda využití druhotných surovin je ekonomické hledisko, popílek je výrazněji levnější než přírodní lehké násypové materiály. Diplomová práce se zaměřuje na využití popílků pocházejících z teplárny Přerov, které jsou uloženy na úložišti Předmostí, na dálnici D1 v úseku Přerov – Lipník nad Bečvou. Popel a popílek z tepláren byl zhruba do 60. let 20. století, považován pouze jako odpad. Okolo 50 % popílků je využíváno ve stavebnictví a zbytek se ukládá na deponie. Pro potřeby výzkumu byly odebrány vzorky, na kterých byly následně provedeny laboratorní zkoušky ke zjištění jejich chemických a fyzikálně - mechanických vlastností. Tyto vlastnosti byly porovnány s požadovanými parametry pro zabudování popílků do zemního tělesa silničních komunikací, které jsou uvedeny v technickém předpisu TP 93. Následně byl popílek zkoumán jako pojivo, tj. popílek smíchaný se zeminou. Po porovnání vlastností bylo určeno, zda je popílek vhodným násypovým materiálem, a byl navrhnut postup vedoucí ke zkvalitnění jeho vlastností.

## **2 Vznik a vlastnosti popílků**

Popílek je nejjemnější frakcí zbytku ze spalování uhlí, zachycuje se v odlučovačích. Představují dominantní podíl všech vedlejších energetických produktů (VEP). Jedná se o heterogenní materiál, který je tvořen částicemi s variabilními vlastnostmi. Vlastnosti popílků závisí především na kvalitě používaného uhlí a na použité technologii spalování.

[1], [12]

### **2.1 Kvalita používaného uhlí**

Vlastnosti a kvalita uhlí závisí na intenzitě a době karbonifikace (prouhelnění). Čím déle trvá proces karbonifikace, tím je uhlí kvalitnější. Nejstarší je antracit (90-95% C), černé uhlí (80-90% C), dále hnědé uhlí (70% C), lignit (60% C), rašelina (50% C). Z ekologicko-ekonomického hlediska je nejkvalitnější antracit, kvůli jeho největší výhřevnosti. Čím více je uhlí kvalitní, tím méně popílek obsahuje podíl anorganických nespalitelných příměsí. Jemnost namletí spalovaného uhlí ovlivňuje zrnitost popílku.

[1]

### **2.2 Technologie spalování uhlí**

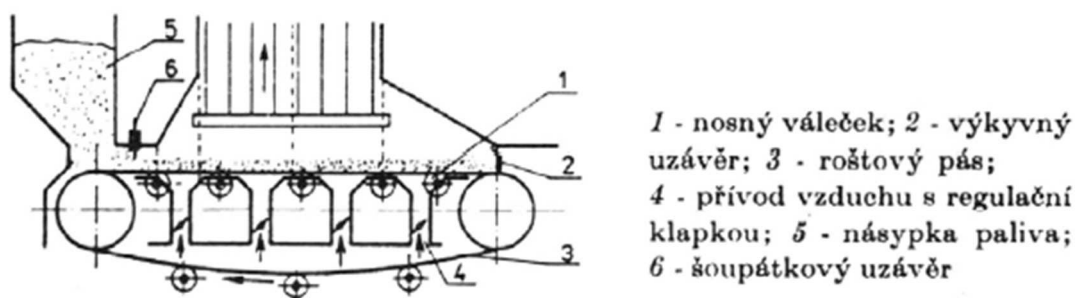
Spalovací procesy v teplárnách a elektrárnách probíhají v roštových, práškových a fluidních ohništích.

[1]

#### **2.2.1 Roštová ohniště**

Používají se ke spalování kusových tuhých paliv, které se ukládají do vrstvy na rošt. Spalovací rošt vytváří a udržuje vrstvu paliva v požadované tloušťce a prodyšnosti, dále zajišťuje přívod kyslíku a zachycuje zbytky spalování. Tato ohniště jsou prakticky nahrazena ohništi práškovými.

[1]



Obr. 1. Roštové ohniště s pásovým roštem [2]

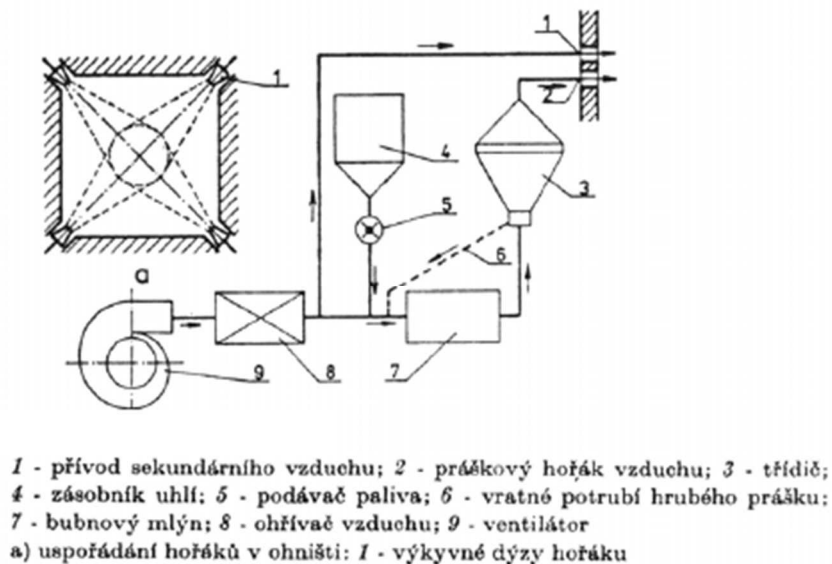
### 2.2.2 Prášková ohniště

Patří k nejčastěji využívaným typům ohnišť. Spaluje se v nich uhelný prášek, který je dodáván hořáky do spalovacího prostoru. Dle způsobu vypouštění (elektrárenské nebo teplárenské) strusky se tato ohniště dělí na granulační a výtavná.

Granulační ohniště dosahují teplot od 1100-1500°C, nedochází zde k tvorbě tekuté strusky. Po vychladnutí ohniště vzniká tuhá škvára, která se potom mechanicky nebo hydraulicky odvádí.

Výtavná ohniště dosahují na rozdíl od granulačních vyšších teplot, vzniká zde tekutá struska. Zbytky se po spálení paliva shromažďují na dně ohniště.

[1]

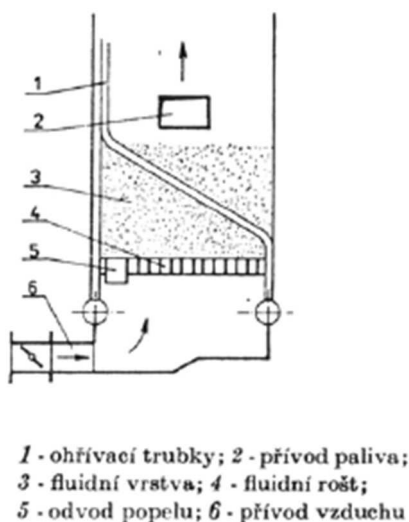


Obr. 2. Práškové ohniště [2]

### 2.2.3 Fluidní ohniště

Ke spalování rozdrčeného paliva dochází ve vznosu, kde je palivo nadnášeno proudem vzduchu. Kromě výhodného rozložení tepelné zátěže a vysoké účinnosti umožňuje i odsíření spalin, je ekologicky nejvýhodnější pro méně kvalitní hnědé uhlí.

[1]



Obr. 3. Fluidní ohniště [2]

## 2.3 Vlastnosti popílků

Popílký bývají charakterizovány fyzikálními, mechanickými, morfologickými vlastnostmi a mineralogickým a chemickým složením.

[1], [3]

### 2.3.1 Mineralogické složení popílků

Mineralogické složení popílků je dáno obsahem a složením nehořlavých částic v uhlí: Popílký obsahují šest hlavních skupin minerálních látek:

- Hydro silikáty a aluminosilikáty
- Minerály železa (magnetit, maghemit, hematit)
- Karbonátové skupiny (kalcit, siderit,...)
- Akcesorické minerály (křemen, cristobalit,...)
- Skelnou fázi (obsah této fáze závisí na podmínkách spalování)
- Zbytky nespáleného uhlí

Dle hydraulického hlediska můžeme mineralogické složky popílků rozdělit na aktivní a neaktivní složky.

Aktivní složky:

- Hydraulické amorfni (aktivní  $\text{SiO}_2$ , amorfni bazické elektrárenské strusky s vysokým obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sklovitá fáze)
- Hydraulické krystalické (metakaolinit, hlinitany)
- Nehydraulické ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ , anhydrit)
- Budiče (sulfidy, alkalické soli)

Neaktivní složky:

- Nespálené uhlí
- Elektrárenská struska s vysokým podílem  $\text{SiO}_2$
- Krystalické složky (křemen, mullit)

[1]

### 2.3.2 Chemické složení popílků

Chemické složení popílků z velké části odpovídá obsahu a složení nespalitelných částic v původním uhlí. Popílek je různorodý materiál z částic, které mají rozdílné chemické složení. Různorodé chemické složení vzniká, z důvodu vystavení všech mineralogických složek rozdílnou dobu vysokým teplotám. Hlavními složkami popílků jsou oxidy křemíku, hliníku a železa, vápník a neprohořelé zbytky vyjádřené jako ztráta žíháním (LOI – loss of ignition).

[1]

### 2.3.3 Fyzikálně- mechanické vlastnosti popílků

- **Zrnitost** – Granulometrie popílků je ovlivňována jemností mletí uhlí, rychlostí tvorby cenosfér (oválné duté částice, vznikající při spalování uhlí od 1200 do 1500 °C) a obsahem nespáleného uhlí. Výslednou křivku zrnitosti ovlivňuje podíl prchavých složek a minerální složení uhlí. Typ ohniště není pro zrnitost rozhodující. Velikost jednotlivých zrn popílku se pohybuje v rozmezí 0,1 – 100  $\mu\text{m}$ .
- **Vlhkost** – Měla by se blížit optimální vlhkosti, kterou zjistíme pomocí zkoušky Proctor standart. Částečným problémem je, že popílků musíme vlhčit popřípadě vysušovat. Optimální vlhkost je velmi variabilní, závisí na zdroji popílku. Popílek ze sil má optimální vlhkost nižší než popílek z odkališť.



- **Objemová hmotnost** – Jedná se o lehkou stavební hmotu. Suchá objemová hmotnost dosahuje 650 - 900 kg. m<sup>-3</sup>. Dobře zhutněný popílek při optimální vlhkosti může dosahovat suché objemové hmotnosti až 1200 kg. m<sup>-3</sup>.
- **Smyková pevnost** – závisí na úhlu vnitřního tření popílku. Soudržnost popílků je zanedbatelná. Smyková pevnost je závislá na objemové hmotnosti a vlhkosti vzorku.
- **Deformační vlastnosti** – Modul deformace dosahuje zhruba 5 – 12 MPa, při zhutnění na 95% PS (Proctor standart). Jemný popílek má nejvyšší modul deformace, hrubý nejnižší.
- **Poměr únosnosti CBR** – Popílký vzniklé spalováním antracitu a černého uhlí dosahují únosnosti CBR cca 15 % bez sycení, po sycení cca 13 %. Hodnoty jsou prakticky stejné jako hodnoty přírodních zemin stejné zrnitosti.
- **Propustnost** – Čím je popílek jemnější, tím je nižší jeho koeficient filtrace, který se pohybuje v rozmezí 5. 10<sup>-6</sup> – 5. 10<sup>-4</sup> m. s<sup>-1</sup>. Koeficient filtrace optimálně zhutněného popílku je přibližně rovný 10<sup>-6</sup> - 10<sup>-8</sup> m. s<sup>-1</sup>. Propustnost popílků je závislá na objemové hmotnosti, stupni zhutnění, zrnitosti a pórovitosti.

[3]

## 2.4 Klasifikace popílků

Dle fyzikálních, chemických a mineralogických vlastností popílků bylo zpracováno několik klasifikací popílků. Následně byla prof. Fečkem navržena klasifikace popílků, která si dala za cíl sjednotit veškeré předešlé klasifikace. Bohužel, dosud nebyla v České republice, v Evropské unii nebo celosvětově přijata jednotná klasifikace vedlejších energetických produktů (VEP).

### 2.4.1 Návrh mezinárodního klasifikačního systému

Klasifikace popílků dle návrhu mezinárodního klasifikačního systému, rozděluje popílký do čtyř skupin podle procentuálního obsahu SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

[1]

<b>I. Klasifikace (mezinárodní klasifikační systém)</b>				
skupina	popílek	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>
I.	ALUMOSILIKÁTOVÝ	> 2	< 15	nedef.
II.	SILIKÁTOALUMINÁTOVÝ	< 2	< 15	< 3
III.	SULFÁTOALKALICKÝ	nedef.	> 15	> 3
IV.	jiný (vápenatý)	nedef.	> 15	< 3

Tabulka č. 1: Návrh mezinárodního klasifikačního systému popílků [1]

#### 2.4.2 Klasifikace dle ASTM C 618

Klasifikace dle americké normy ASTM C618 dělí popílků na dvě třídy, na popílků kyselých a popílků alkalických. Problém této klasifikace je, že nereflextuje obsah CaO. Tento problém se snažil odstranit McCarty v roce 1990, který navrhl tři stupně členění.

[1]

<b>II. Klasifikace (ASTM C618)</b>			
třída	popílek	Ca, Fe, suma oxidů (%)	CaO (%)
F	kyselý	velmi málo Ca značné množství Fe (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O) > 70	< 10 10 - 20
C	alkalický	značné množství Ca (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O) > 50	> 20

Tabulka č. 2: Klasifikace popílků dle ASTM C 618 [1]

#### 2.4.3 Klasifikace dle CSA. A23

Klasifikace popílků podle kanadské normy CSA. A23 z roku 1998, rozděluje popílků do tří skupin podle obsahu CaO. Hlavním cílem této klasifikace je určení účinků na vlastnosti a tvrdnutí cementu.

[1]

<b>III. Klasifikace (CSA.A23)</b>			
typ	popílek podle obsahu Ca	CaO (%)	ztráta žíháním (%)
F	nízký	< 8	< 8
Cl	střední	8 - 10	< 6
CH	vysoký	> 20	< 6

Tabulka č. 3: Klasifikace popílků dle CSA. A23 [1]

#### 2.4.4 Klasifikace popílků dle zdroje spalovaného uhlí

Klasifikace rozděluje popílky na dvě třídy dle zdroje spalovaného uhlí.

[1]

IV. Klasifikace (podle zdroje)		
třída	popílek ze spalování	CaO (%)
1	antracitu, resp. bituminózního uhlí	< 5
2	hnědého uhlí	15 - 35

Tabulka č. 4: Klasifikace popílků dle zdroje spalovaného uhlí [1]

#### 2.4.5 Klasifikace popílků podle obsahu CaO

V této klasifikaci se dělí popílky do tří kategorií na základě kolísání obsahů  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$  a CaO.

[1]

V. Klasifikace				
třída	popílek podle obsahu CaO	CaO (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (%)
I.	nízký	< 4	6 - 35	70 - 90
II.	střední	4 - 20	6 - 25	40 - 70
III.	vysoký	> 20	6	40 - 65

Tabulka č. 5: Klasifikace popílků podle obsahu CaO [1]

#### 2.4.6 Klasifikace popílků dle vápenného indexu

V následující klasifikaci se hodnotí tzv. pucolánová reaktivnost, kterou určujeme pomocí vápenného indexu. Vápenný index je poměr CaO k součtu  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ .

[1]

VI. Klasifikace (vápenný-lime index)
Hodnotí tzv. pucolánovou reaktivnost, reaktivní kvalitu, pomocí poměru
$\text{CaO} : (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ , kromě situací, když % CaO < 4

Tabulka č. 6: Klasifikace popílků dle vápenného indexu [1]

#### 2.4.7 Navrhovaná klasifikace popílků

Navržená klasifikace popílků zohledňuje všechny předchozí klasifikace. Dělí popílky podle obsahu oxidů vápníku, křemíku, hliníku, železa, množství nedopalu a dle zdroje materiálu, do tří skupin.

[1]

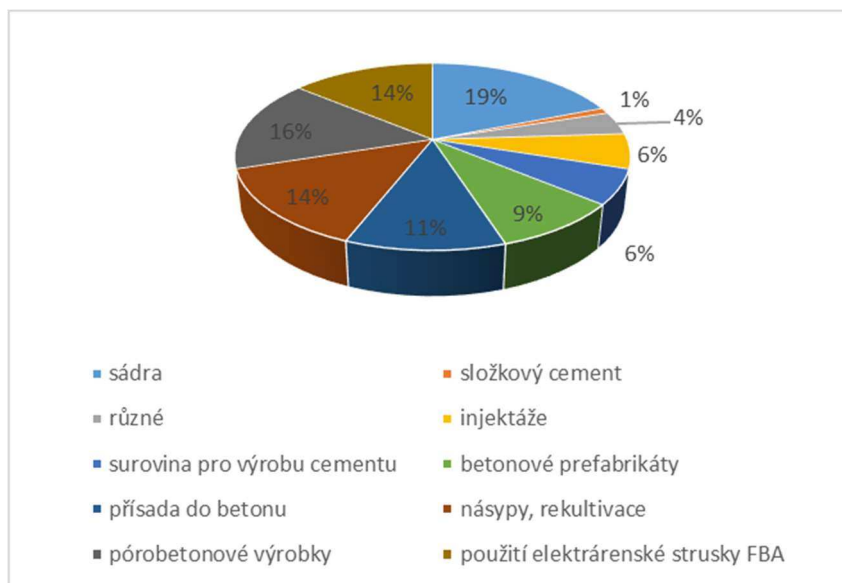
Typ popílku	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Nedopal (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Zdroj materiálu
Aluminokřemičitý	> 2	< 4	0 - 16	4 - 25	Antracit + černé uhlí
Křemičitohlinitý	1 - 2	4 - 20	< 4	5 - 25	Antracit + hnědé uhlí
Vápenatý	< 2	> 20	≤ 1	6 - 10	Hnědé uhlí

Tabulka č. 7: Navrhovaná klasifikace popílků[1]

### 3 Využití popílků ve stavebnictví

Popílek se ve stavebnictví využívá již mnoho let. Popílký mají pro stavební praxi velmi výhodné vlastnosti. Nejčastěji se popílek využívá pro výrobu stavebních materiálů, pro sanaci důlních děl a v dopravním stavitelství.

[1], [13]



Obr. 4. Druhotné využití křemičitých popílků ve stavebnictví, Velká Británie 2004 [3]

#### 3.1 Využití popílků ve výrobě stavebních materiálů

První využití popílků při výrobě stavebních materiálů se datuje k 30. létům 20. století. Poprvé byly popílký použity při výrobě betonu v USA. První masivnější využití popílků bylo při výstavbě přehrady Hungry Dam v roce 1948. V této stavbě bylo použito cca 12 000 tun popílků, jako přísady do betonu. Popílek zlepšil zpracovatelnost, propustnost a alkalickou odolnost proti síranům. Následně se popílký začaly využívat v následujících oblastech:

- Výroba umělých lehčených, lehkých a hutních kameniv
- Výroba betonu
- Výroba pórobetonu nebo pěnobetonu
- Výroba maltovin a omítkových směsí
- Výroba keramiky
- Výroba cementu, ve funkci korekčních složek surovinové směsi, ale i při výrobě cementu mletím slínku

[1], [3]

### **3.1.1 Výroba umělých lehčených, lehkých a hutních kameniv**

Umělým kamenivem je možno částečně, nebo i úplně nahradit přírodní kamenivo. Důležité je zabránit výluhům toxických látek. Pro výrobu lehčených kameniv se využívá jak popílek, který vzniká při spalování o vysoké teplotě cca 1200 °C (elektrárenský, teplárenský), tak i popílek, který vzniká spalováním při teplotě cca 850 °C (fluidní). Jako pojivo se využívá nejčastěji cement a vápno.

Rozdělení umělého kameniva dle způsobu vytvrzení:

- Technologie za studena, tj. klasické zrání ve vlhkém prostředí
- Technologie za zvýšené teploty, tj. urychlené zrání pomocí propařování
- Technologie za zvýšené teploty a tlaku, tj. urychlené zrání v autoklávu
- Technologie spékání, tj. při teplotách nad 1000 °C

[1]

### **3.1.2 Výroba betonu**

Popílek se používá do prostého betonu nebo do železobetonu, nesmí se používat do betonu předepjatého. K tomuto použití se hodí popílek, který je vytvořen spalováním při teplotách nad 1200 °C. Popílek se při výrobě betonové směsi využívá k nahrazování kameniva nebo cementu. Popílek, který je používán, jako plnivo doplňuje chybějící nejjemnější frakce kameniva. Popílek, který je použitý jako aktivní složka betonu k částečnému nahrazení cementu, zlepšuje díky svým pucolánovým vlastnostem kvalitu betonu. Zejména ovlivňuje zpracovatelnost a čerpatelnost, snižuje vývoj hydratačního tepla, a tím omezuje tvoření trhlin, zmenšuje dotvarování, zmenšuje propustnost, zlepšuje odolnost proti mrazu a proti agresivním vlivům, čímž se zvyšuje trvanlivost staveb.

[1]

### **3.1.3 Výroba pórobetonu nebo pěnobetonu**

Při výrobě pórobetonu a pěnobetonu se popílek uplatňuje jako náhrada křemičitého písku. Většina fluidních popílků je pro toto použití nevhodná. Pro výrobu těchto betonů je důležité, že popílek je více reaktivní než křemičitý písek. Hlavní problém popílku při výrobě pórobetonu a pěnobetonu je kolísání jeho složení, zejména ztráta žíháním a dále jeho jemnost. V současné době už se pórobetony a pěnobetony na bázi popílku prakticky nevyrábí.

[1]

### 3.1.4 Výroba maltovin a omítkových směsí

Při výrobě maltových směsí se jedná o celý sortiment výrobků. Malty tepelně izolační, speciální malty na pórobetony, malty na venkovní a vnitřní použití a další. Ve všech případech musíme ověřit fyzikálně - chemické vlastnosti těchto popílků, které musí splňovat předepsané normy pro výrobu malt. Základními požadavky jsou pevnost v tahu za ohybu malty, přilnavost k podkladu a pevnost v tlaku.

Dalším použitím je výroba suchých omítkových směsí, kde je popílek využíván jako plnivo, tak i jako pojivo díky svým pucolánovým vlastnostem. Fluidní popílek se pro suché omítkové směsi prakticky nepoužívá.

[1]

### 3.1.5 Výroba keramiky

Dlaždice a obkladačky se dají vytvořit i z méně tradičních surovin, mezi které patří i elektrárenský a teplárenský popílek. Popílek se používal jako hlavní složka směsí pro výrobu dlaždic a obkladaček s barevným střepem. Pro výrobu dlaždic a obkladaček se používá směs, kde kromě jílu a hlíny je i 60 – 80 % popílku. Směs, která má jako hlavní surovinu elektrárenský popílek a různé druhy jílu, obsahuje po vypálení kromě malého množství mullitu i novou krystalickou fázi cristobalit. Množství cristobalitu se dá regulovat množstvím popílku, teplotou spalování a dobou vypalování. Vzniklý cristobalit zvyšuje pevnost dlaždic a obkladaček.

[1]

### 3.1.6 Výroba cementu

Popílků, které obsahují  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , reagují s hydroxidem vápenatým  $\text{Ca(OH)}_2$ . Tato vlastnost se nazývá pucolánová aktivita, která souvisí s obsahem  $\text{SiO}_2$  ve skelné fázi (čím více je skelné fáze, tím je popílek reaktivnější). Pucolány se používají ke snížení hydratačního tepla a na snížení spotřeby cementu. Vysokoteplotní popílků většinou vykazují pouze pucolánové vlastnosti. Fluidní popílků vykazují i vlastnosti hydraulické.

[1]

## 3.2 Využití popílků v dolech

V dolech se využívá křemičitý popílek z elektráren a tepláren (vzniká při spalování nad  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ). Ve všech dolech jsou tzv. plavící zařízení, kterými se popílek smíchaný s vodou splavuje do podzemí. Toto zařízení je tvořeno zásobníky o objemu  $100\text{ m}^3$ , šnekovými podavači, míchačkami, zásobními nádržemi směsí, čerpadly pro změnu zahuštění směsí,

plavícím potrubím, kontrolními a ovládacími centry. Zahuštění směsí se pohybuje okolo 600 až 1000 g tuhých částí na litr vody. Plavená směs se využívá na protizáparové prevence v porubech. Dále se plavená směs využívá k sanaci uzavřených důlních děl. Pomocí této směsi se vytvářejí izolační hráze pro jejich uzavření.

[1]

### **3.3 Využití popílků v dopravním stavitelství**

První využití popílků v dopravním stavitelství se datuje k roku 1952 ve Velké Británii. V USA se popílký začaly využívat až v 70. letech 20. století. Do 90. let 20. století byly popílký v České republice využívány pouze na zásypy a vyrovnávání terénních nerovností v blízkosti zdroje tohoto popílku. Od této doby se v České republice využití těchto popílků rapidně zlepšilo.

Popílký, které jsou navlhčené na optimální vlhkost, jsou ideální surovinou pro zhutněné zásypy, násypy a obsypy. Popílký můžeme používat i jako konstrukční vrstvy vozovek nižších tříd. Popílký se v násypech uplatňují buď jako sypanina nebo jako popílkový stabilizát. Technologické postupy při výstavbě zemních těles s využitím popílků jsou podrobně popsány v TP 93.

Při výstavbě násypu z popílku se každá navezená vrstva popílků musí zhutnit. Po celou dobu výstavby se sleduje vlhkost popílků, aby byla zajištěna optimální vlhkost. Tyto materiály do násypů jsou ukládány tak, že se svahy násypů musí překrýt přísypem minimální tloušťky 600mm z vhodné zeminy. Zemina přísypu se ukládá na podélnou hrázku vždy před nasypáním popílku a současně se hutní a rozhrnuje. Pokud není u popílku prokázána odolnost proti mrazu, musí být vrstva popílku zhutněna a zasypána zeminou. Po celou dobu výstavby musí být zajištěno odvedení vody ze stavby.

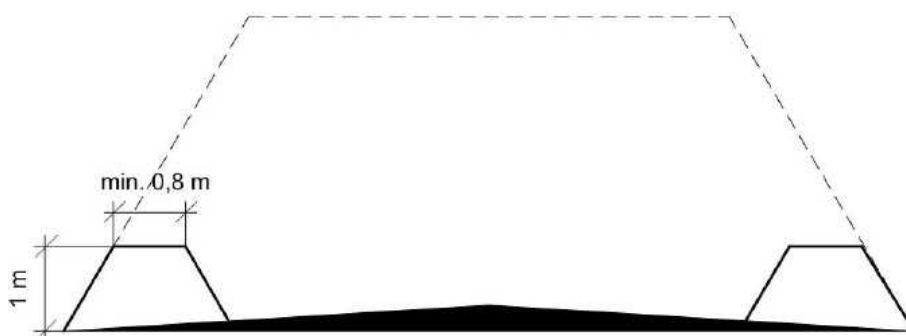
Největší použití popílku v dopravním stavitelství v České republice bylo na stavbě dálnice D11 Osičky- Hradec Králové, kde bylo do násypového tělesa dálnice zabudováno více než 200 000 tun popílků.

[3], [14], [11]

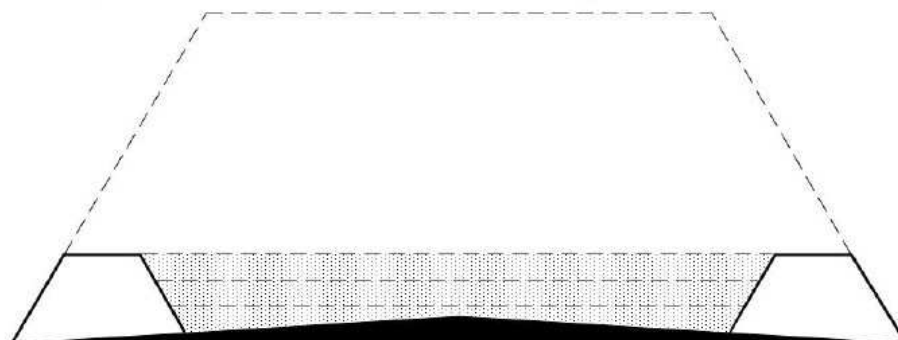




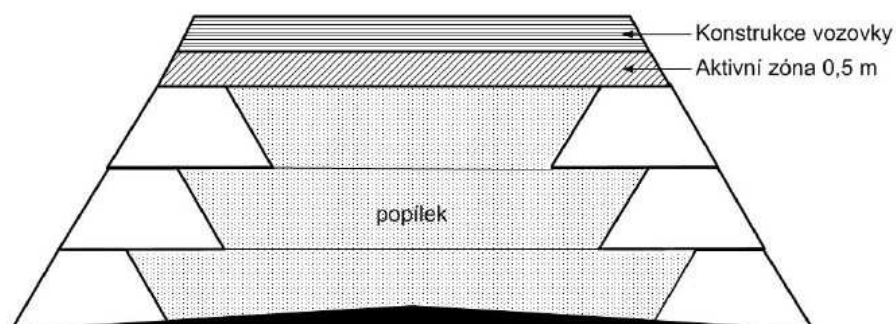
1. Vyspádování, urovnání a přehutnění podloží



2. Vybudování základních hrázek z běžné zeminy



3. Navezení vrstvy popílku mezi hrázky a zhutnění.  
Vrstva cca 0,30 - 0,35 m



4. Dokončení zemního tělesa z popílku, aktivní zóna z vhodné zeminy  
splňující kritéria  $E_o = 45 \text{ MPa}$  při 100 % zhutnění

Obr. 5. Postup ukládání popílků v násypech

[14]

## 4 Průkazní zkoušky dle TP93

-Mezi průkazní zkoušky dle TP 93 patří:

- Zrnitost
- Zkouška Proctor standard
- Kalifornský poměr únosnosti CBR
- Objemové změny
- Analýza výluhu

Zkouška	Parametr	Požadovaná hodnota	Norma/předpis
Zrnitost */	křivka zrnitosti	Není stanovena	ČSN CEN ISO/TS 17892-4
Zkouška Proctor-Standard (PS)	max. $\rho_d$ , $W_{opt}$	95 % max. $\rho_d$	ČSN EN 13286-2
Pórovitost */	$n\% = (1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}) \cdot 100$	$n \leq 65\%$ při zhuštění 95 % PS	
Únosnost CBR	index CBR po 4 denním uložení na vzduchu při zabránění odpařování	CBR <sub>10</sub> při 95 % PS u PP	ČSN EN 13286-47
	index CBR <sub>sat.</sub> po 4 denním sycení vodou**/	CBR <sub>15</sub> při 95 % PS u PSt/FPP (po 7 dnech uložení ve vlhku a následném sycení)	
Objemové změny	% bobtnání v CBR válci	LS <sub>5</sub>	ČSN EN 13286-47
Analýza výluhů	Zastoupení prvků (v mg/l)	viz. tab. č. 1	

\*/ U PSt odpadá

\*\*/ Pokud se průběžným měřením prokáže, že sycení vzorku je ukončeno dříve, je možné zkoušku CBR provést za kratší dobu než za 4 dny.

Obr. 6. Základní průkazní zkoušky dle TP 93

[5]

### 4.1 Zrnitost – Prosévací zkouška

Provádí se dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-4. Granulometrické složení neboli zrnitost zemin nám udává hmotnostní podíl jednotlivých frakcí k celkovému složení zeminy. Zrnitost vyjadřujeme tzv. křivkou zrnitosti. Křivka zrnitosti je součtová čára, která udává kumulativní relativní četnost hmotnosti jednotlivých frakcí, daných jejich podílem na celkové hmotnosti zkoušeného vzorku. Prosévací zkouška se provádí pouze pro zeminy, které mají větší průměr zrna než 0,063 mm (nejmenší síto).

**Pomůcky:**

- Sada normovaných sít
- Prosévací přístroj
- Váhy

**Postup síťového rozboru:** Vysušíme odebraný vzorek a odebereme z něj navážku M. U zeminy provedeme úpravy, aby byla oddělena jednotlivá zrna. Navážku nasypeme na síta a následně sadu sít umístíme do prosévacího přístroje. Prosévací přístroj necháme zapnutý minimálně 6 minut. Propady jednotlivých sít zvážíme, a následně vypočítáme procentuální podíl z celkové navážky.

$$Z_i = \frac{M_i}{M} \quad [5.1]$$

Kde  $Z_i$ ... Procentuální podíl z celkové navážky

$M_i$ ... Hmotnost jednotlivého propadu sít

$M$ ... Celková hmotnost navážky

Rozdíl mezi celkovou hmotností navážky a součtem hmotností jednotlivých propadů sít se nesmí lišit o více jak 1 %.

[16], [18]



Obr. 7. Prosévací přístroj. Foto: M. Rochovanský, 2016

## 4.2 Zkouška Proctor standard

Název zkoušky nese jméno amerického stavebního inženýra R. R Proctora (1894 – 1962), který v roce 1933 dokázal, že suchá objemová hmotnost závisí na množství vody v materiálu. Provádí se dle normy ČSN EN 13286-2. Zkouška zhutnitelnosti (Proctor standard) se používá ke stanovení maximální suché objemové hmotnosti a optimální vlhkosti zeminy. Pokud má zemina optimální vlhkost, dosáhne maximální objemové hmotnosti suché zeminy.

### **Pomůcky:**

- Proctorův přístroj
- Váha
- Zkušební válec

**Postup zkoušky Proctor standard:** Zemina se nechá vysušit na vzduchu, následně se rozdrolí a přeseje přes síto o průměru oka 5 mm. Zemina se navlhčí cca o 5% méně, než je očekávaná optimální vlhkost. Potřebné množství vody se vypočítá dle vztahu:

$$m_w = \frac{w_p}{100} m_s \quad [5.2]$$

Kde  $m_w$ ... potřebné množství vody [kg]

$w_p$ ... požadovaná vlhkost [%]

$m_s$ ... hmotnost vzorku zeminy [kg]

Navlhčená zemina se nechá 24 hodin odležet, aby se vlhkost rovnoměrně rozdělila. Zváží se celý zhutňovací válec bez nástavce, změří se jeho výška a průměr a následně se dopočítá objem válce. Hutnění se provádí energií Proctor standard, což znamená, že se vzorek zeminy hutní ve třech vrstvách, každá 25 úderů, které jsou rozděleny po celé ploše válce. Po ukončení zhutňování se odstraní nástavec válce a zarovná se povrch zeminy tak, aby byla zemina zároveň s horním okrajem válce. Zhutňovací nádoba se zváží. Zhutněná zemina se vytlačí z válce a dále se odeberou 2 vzorky ke zjištění vlhkosti. Následně se vypočte objemová hmotnost suché zeminy dle vztahu:

$$\rho_d = \frac{m}{V(1 + w)} \quad [5.3]$$

Kde  $\rho_d$ ... Objemová hmotnost suché zeminy [kg. m<sup>-3</sup>]

$m$ ... Hmotnost zhutněné zeminy ve válci [kg]

$V$ ... Objem válce [m<sup>3</sup>]

$w$ ... vlhkost zeminy

Tento pokus se opakuje s měnící se vlhkostí (minimálně 5x). Vlhkost se postupně zvyšuje cca o 2%. Vypočtené hodnoty suché objemové hmotnosti a příslušné vlhkosti se vynesou do grafu. Spojnice bodů tvoří tzv. Gaussovu křivku. Vrchol této křivky udává optimální vlhkost, u které dosáhne maximální objemové hmotnosti suché zeminy.

[16], [19]



Obr. 8. Výsledek Proctorovy zkoušky – Gaussova křivka

[16]



Obr. 9. Proctorův přístroj. Foto: M. Rochovanský, 2016

### 4.3 Pórovitost

Pro stanovení pórovitosti, se musí nejprve určit měrná hmotnost. Měrná hmotnost se stanoví pomocí pyknometru, dle normy ČSN 72 1011.

**Pomůcky pro stanovení měrné hmotnosti:**

- teploměr
- vaříč
- pyknometr
- váhy

**Postup:** Suchý a čistý pyknometr se zváží i se zátkou s přesností na 0,001 g ( $m_1$ ). Do 1/3 pyknometru se nasype vzorek frakce do 0,125 mm a zváží se ( $m_2$ ). Pyknometr se přibližně do tří čtvrtin doplní vodou. Takto připravený pyknometr se umístí na vaříč a 15 minut se vaří, přičemž ovšem nesmí voda dosáhnout teploty varu. Poté se pyknometr doplní destilovanou vodou a temperuje na 20 °C. Osušený pyknometr se následně zváží ( $m_3$ ). Měrná hmotnost se vypočte dle vztahu:

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1)\rho_v}{\rho_v \cdot V + m_2 - m_3} \quad [5.4]$$

$$V = \frac{m_v - m_1}{\rho_v} \quad [5.5]$$

Kde  $\rho_s$ ... Měrná hmotnost zeminy [g. m<sup>-3</sup>]  
 $\rho_v$ ... Měrná hmotnost vody při teplotě 20 °C (0,9982 g. m<sup>-3</sup>)  
 $m_v$ ... Vodní hodnota pyknometru [g]  
 $m_1$ ... Váha suchého a čistého pyknometru [g]  
 $m_2$ ... Váha naplněného pyknometru vzorkem zeminy [g]

Po stanovení měrné hmotnosti zkoušeného vzorku lze vypočítat jeho pórovitost dle vztahu:

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \cdot 100 \quad [5.6]$$

Kde  $n$ ... Pórovitost [%]  
 $\rho_d$ ... Objemová hmotnost suché zeminy [kg. m<sup>-3</sup>]

[5], [16], [20]



Obr. 10. Pyknometr. Foto: M. Rochovanský, 2016

#### 4.4 Kalifornský poměr únosnosti CBR

Kalifornský poměr únosnosti (california bearing ratio) se určuje dle normy ČSN EN 13286 – 47, je to číslo udávané v procentech, které vyjadřuje poměr síly potřebné k zatlačení trnu konstantní rychlostí do stanovené hloubky vzorku zeminy, oproti síle potřebné k zatlačení stejného trnu do stejné hloubky normového materiálu. Normový materiál je kalifornský vápenec (CBR=100%).

$$CBR = \frac{F}{F_s} 100 \quad [5.7]$$

Kde CBR... Kalifornský poměr únosnosti [%]

F... Síla potřebná k zatlačení trnu konstantní rychlostí do předem stanovené hloubky zeminy [KN]

F<sub>s</sub>... Síla potřebná k zatlačení trnu konstantní rychlostí do předem stanovené hloubky normového kameniva [KN]



**Pomůcky:**

- Zkušební Proctorův válec
- CBR přístroj
- Proctorův přístroj
- Váha

**Postup zkoušky:** Příprava vzorku spočívá v navlhčení na jeho optimální vlhkost. Následně se vzorek zhutní pomocí Proctorova přístroje a vzorek se nechá zrát předepsaným způsobem. Po dozrání vzorku se vzorek otočí, tzn. původně spodní strana je určena k měření. Vzorek se umístí do středu zatěžovacího lisu a následně se přitíží zatěžovacím prstencem. Před počátkem měření se provede dosednutí trnu na vzorek. Poté dojde ke spuštění samotného měření, kde trn vniká do zeminy konstantní rychlostí  $1,27 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Měření končí ve chvíli, kdy trn dosáhne hloubky 10 mm. Určitým druhem zkoušky CBR je i zkouška IBI, při které se trn zatlačí do vzorku bez zrání a bez přitížení zatěžovacím prstencem. Zkouška IBI se používá pro rychlou kontrolu únosnosti zemin.

[15], [21]



Obr. 11. Přístroj CBR. Foto: M. Rochovanský, 2016

## 4.5 Objemové změny

Jedná se o stanovení lineárního bobtnání při zkoušce CBR dle ČSN EN 13286 – 47 a přílohy 3 TP 93.

### Pomůcky:

- Proctorův přístroj
- Zkušební válec s nástavcem
- Úchylkoměr
- Nádobu na saturování vzorku

**Postup:** Vzorek se nahutní do CBR moždíře 100 % PS (Proctor standard). CBR moždíř se zeminou se upevní na perforovanou podložku, zkoušenou částí směrem dolů, zabalí se do igelitu a nechá se 3 dny zrát. Následně se vzorek přesune do nádoby s vodou, která zaručuje jeho saturaci. Na vrch vzorku se osadí přítěžovací prstence, které simulují konstrukci vozovky. Na nástavec se umístí úchylkoměr, který měří lineární bobtnání. Po 96 hodinách se odečte naměřené bobtnání, které následně se vyjádří v procentech k původní výšce válce.

[5], [21]



Obr. 12. Zkušební válec s připevněným úchylkoměrem. Foto: M. Rochovanský, 2016

## 4.6 Analýza výluhu

Provádí se dle normy ČSN EN 12457 – 1-4. Dle chemických vlastností výluhu, který se připraví loužením vzorku smíchaného s vodou v poměru 1 : 10. Zastoupení jednotlivých prvků se uvádí v  $\text{mg.l}^{-1}$ . Jedná se o zkoušky výluhů těžkých kovů. I přes malou rozpustnost jsou těžké kovy velice důležité z hlediska životního prostředí. Čím větší rozpustnost vyluhovatelných kovů, tím je nižší vliv přítomnosti koloidních částic ve výluhu. Tvorba filtračního koláče má velmi vysoký vliv na rozpustnost těžkých kovů, které stanovujeme v rámci této zkoušky. Pro získání správných výsledků je nutné specifikovat faktory ovlivňující výšku filtračního válce. Vedle specifických vlastností vzorku je tloušťka filtračního koláče ovlivněna průměrem filtru a objemem výluhu k filtraci. Důležité je i správné promísení vzorku s vodou. Nejlépe je použít třepačky, které zajistí plynulé převrácení vzorkovnic systémem hlava - pata. Zkoušky se provádí při teplotě 20 až 25°C. Výsledky vyluhovacích zkoušek umožní přímé srovnání s limitními obsahy těžkých kovů ve výluhu popítku. Tyto zkoušky se ve školních laboratořích neprovádějí.

### **Pomůcky:**

- Zařízení pro tlakovou filtraci pro membránové filtry
- Membránové filtry
- Třepačka fungující na systému hlava/pata

**Postup:** Po ukončení třepání se vzorek nechá 15 minut odstát. Tímto se dosáhne usazení větších částic. Následně se celý objem kapalně fáze dekantuje do centrifugační zkumavky. Kapalná fáze se odstředí (30 minut při 2000g). Odstředěná kapalná fáze se převede do zařízení pro tlakovou filtraci. Po 5 minutách beztlakové filtrace se zvýší tlak na 100 kPa, jestliže po 15 minutách bylo přefiltrováno méně jak 2/3 vzorku, zvýší se tlak na 200 kPa. Když je to nutné po 30 minutách se zvýší tlak na 350 kPa. Filtrace pokračuje, dokud není zfiltrován celý objem výluhu. Pokud není filtrace dokončena ani po 2 hodinách, ukončí se a dále se pracuje pouze se zfiltrovaným podílem výluhu.

[17]

Prvek	Maximálně přípustné množství (mg/l)
Ag	0,1
As	0,1
Ba	1,0
Be	0,005
Pb	0,1
Cd	0,005
Cr celkový	0,1
Co	0,1
Cu	1,0
Ni	0,1
Hg	0,005
Se	0,05
V	0,2
Zn	3,0
Sn	1,0

Tabulka č. 8: Limitní hodnoty výluhu dle TP 93 [5]

## 5 Ověření vlastností popílků

Popílek byl odebírán v deponii Předmostí v Přerově, v místech, kde probíhá stavba dálnice D1, úsek Přerov – Lipník nad Bečvou. Jedná se o popílek, který zde byl ukládán z Přerovské teplárny. K ukončení jeho ukládání došlo v roce 1996. Následně byla tato deponie rekultivována. Nad popílky byla navezena vrstva ornice o mocnosti přibližně 1,5m. Odběr vzorků popílku byl proveden z hloubky cca 2 m. Vzhledem ke zpoždění stavebních prací další odběry nebyly možné. V této diplomové práci byly ověřovány vlastnosti popílku jako násypového materiálu a také jako pojiva.

[6], [7], [8]

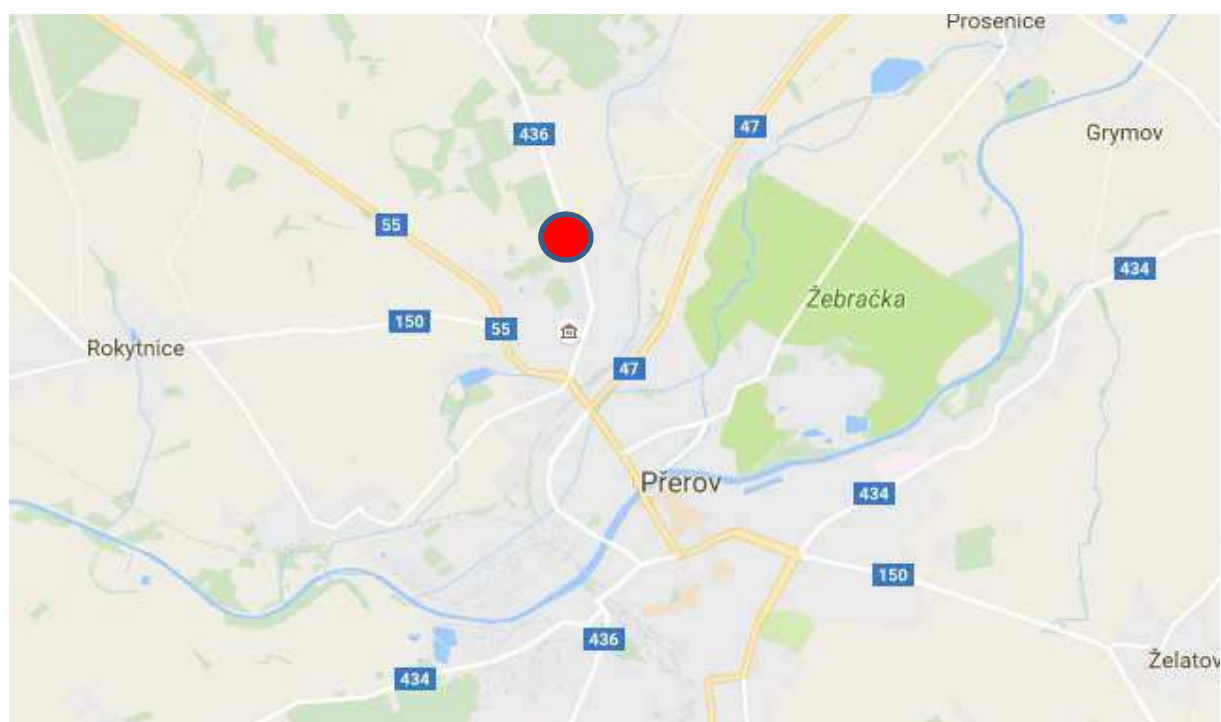


Obr. 13. Odebraný popílek. Foto: M. Rochovanský, 2016





Obr. 14. Místo odběru vzorků popílku. Foto: M. Rochovanský, 2016



Obr. 15. Vyznačená poloha místa odběru vzorků na mapě

## 5.1 Zdroj popílků na úložišti Předmostí – Přerovská teplárna

Teplárna je situována v nezastavěném území. Nejbližší obytná zóna se nachází ve vzdálenosti asi jeden kilometr. Nejbližší položená městská část Henčlov je od teplárny vzdálená přibližně dva kilometry. Použité technologie v teplárně omezují její vliv na okolní prostředí. Teplárna je i poměrně vysokým zdrojem zaměstnanosti v regionu, zaměstnává 113 zaměstnanců.



Obr. 16. Teplárna Přerov [9]

### 5.1.1 Historie teplárny

Výstavba teplárny byla započata v 60. letech dvacátého století. První kotel K1, byl uveden do provozu 15. prosince 1964. Instalace druhého kotle K2, byla provedena v září 1967. Třetí kotel K3 byl naistalován 3. září 1978 a následně v roce 1991 byl naistalován kotel K4. Se spotřebou tepla rostla i nutnost výstavby tepelných sítí, následně teplárna Přerov převzala krytí celé spotřeby města. S navyšováním zákazníků, musela teplárna zvýšit svůj výkon. V momentální době má teplárna 2 vysokotlakové kotle a dva středotlakové kotle, které vyrobí 3 600 TJ tepla ročně. Ve srovnání s ostatními teplárnami v české republice, patří Přerovská teplárna mezi špičku. Z důvodů přísných ekologických limitů a spolehlivosti se teplárna neustále modernizuje. Momentálně teplárna zásobuje 14 600 bytů a více jak 100 přímých zákazníků.

[9], [10]

### 5.1.2 Technologie spalování uhlí v teplárně Přerov

V teplárně jsou instalovány 4 parní kotle označeny K1, K2, K3, K4 a dva turbogenerátory TG1 a TG2. Spaliny z každého kotle jsou svedeny ve dvou různých větvích, ve kterých je zařazen jeden elektrostatický odlučovač. Větve se sbíhají do společné komory, ve které jsou vedeny přes tkaninový filtr do společného komínu. Kotle K1 a K2 jsou vysokotlakové a kotle K3 a K4 jsou středně tlakové.

[9], [10]

Základní parametry:			
Kotel	K1, K2	K3	K4
Výrobce		PBS Brno	PBS Brno
Druh, typ. označení	parní	parní	parní
Typ hořáků	práškový	práškový	práškový
Rok výroby	1963, 1966	1976	1989
Rok uvedení do provozu	1964, 1966	1977	1991
Jmenovitý výkon [t.h <sup>-1</sup> ]	125	100	110
[MW <sub>i</sub> ]	88,6	-	-
Maximální výkon [t.h <sup>-1</sup> ]	125	-	-
Jmenovitý tlak páry [MPa]	9,41	1,23	1,22
Jmenovitá teplota páry [°C]	540	235	235
Účinnost [%]	86	86	86

Tabulka č. 9: Základní parametry spalovacích jednotek [9]

### 5.1.3 Spalovaný materiál v teplárně Přerov

V této teplárně se spaluje černé uhlí – proplástek z Ostravsko – karvinského regionu. Momentálně teplárna bere uhlí od čtyř dodavatelů. Důl Karviná, důl Karviná ČSA, důl Darkov a důl ČSM.

[10]

## 5.2 Popílek jako násypový materiál

### 5.2.1 Chemický rozbor

Nejprve došlo k ověření chemického složení popílků pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie. Na základě naměřených hodnot zastoupení jednotlivých prvků měřitelných pomocí spektrometru a dopočtení předpokládaných množství zjišťovaných oxidů, bylo stanoveno chemické složení odebraných vzorků.



Prvek	%
SiO <sub>2</sub>	51,279
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,778
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,289
MgO	0,8
CaO	1,612
K <sub>2</sub> O	2,978
SO <sub>3</sub>	0,08
S	0,032
Σ	93,848

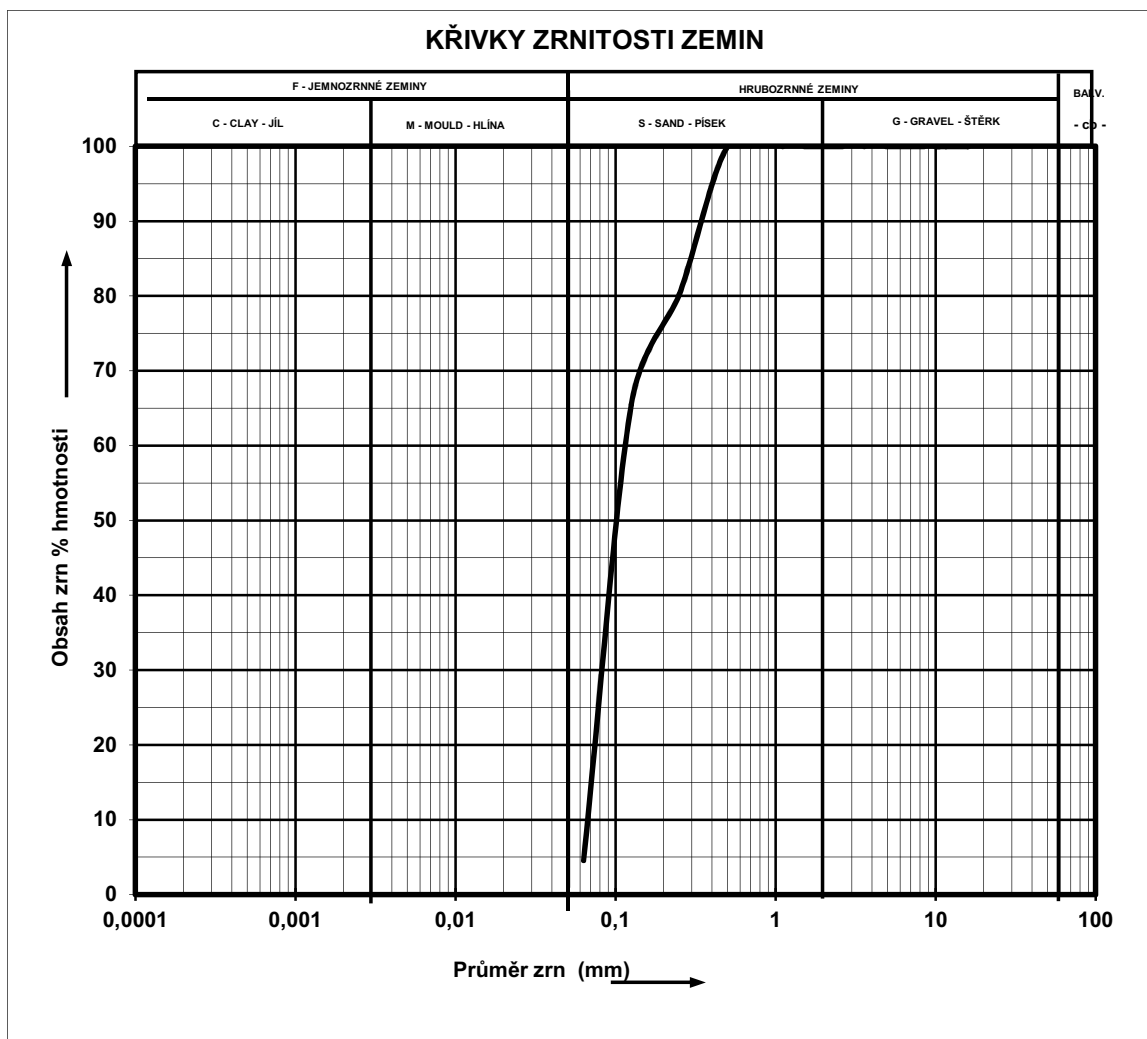
Tabulka č. 10: Chemické složení popílku

Naměřené hodnoty udávají, že z hlediska složení má většinové zastoupení Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a SiO<sub>2</sub> nad 80%. CaO má zastoupení pouze necelé 2 %, z čehož se dají předpokládat minimální objemové změny. Zkouškou bylo ověřeno, že se jedná o vysokoteplotní křemičité popílky a nikoliv o popílky fluidní.

### 5.2.2 Zrnitost

Další provedenou zkouškou byl síťový rozbor. Síťovým rozbořem byla zjištěna zrnitost materiálu. Bylo zjištěno, že se jedná o popílek, který má zrnitost stejnou jako materiál třídy S3, značky S - F, zatříděním dle ČSN 73 6133, Sa podle EN ISO 14688.

[7], [22]



Graf č. 1: Křivka zrnitosti odebraného vzorku popílku

síta (mm)	hmotnost na sítu (g)	hmotnostní propad (g)	zůstatek % na sítu	% propad
16	0	1970	0	100,00
8	0	1970	0	100,00
4	0	1970	0	100,00
2	0	1970	0	100,00
1	0	1970	0	100,00
0,5	0	1970	0	100,00
0,25	390	1580	19,79695431	80,20
0,125	290	1290	14,72081218	65,48
0,063	1200	90	60,91370558	4,57
0	90	0,0	4,568527919	0,00
celkem	1970	g		

hmotnost kameniva	1970	g
-------------------	------	---

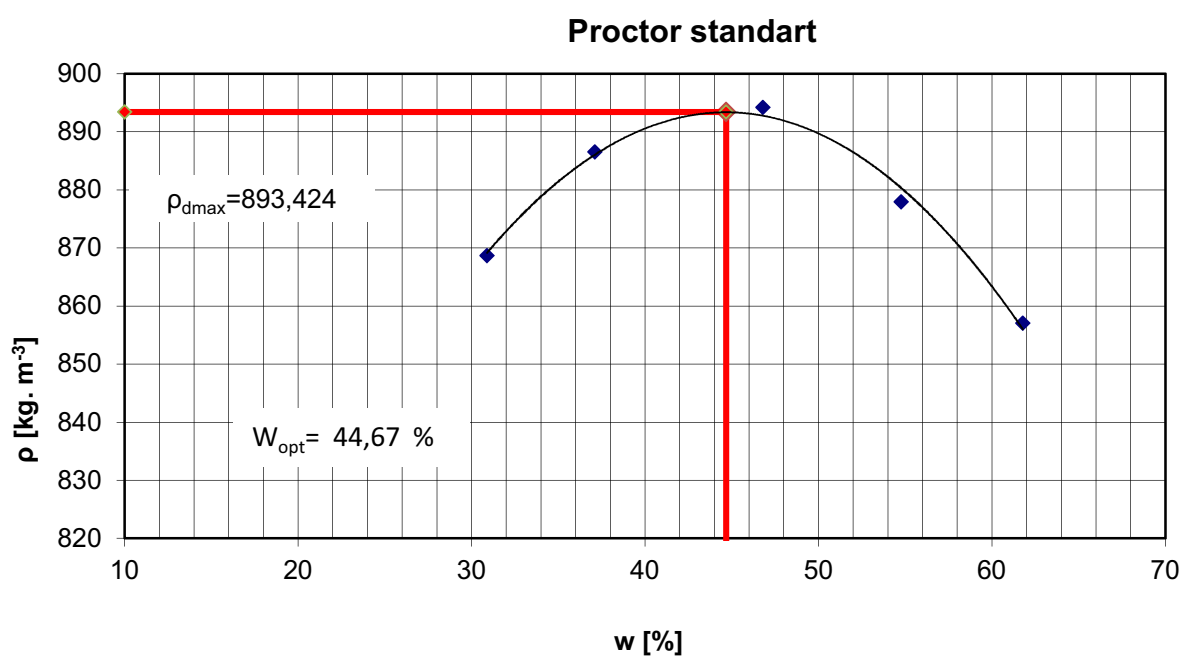
Tabulka č. 11: Propady jednotlivých sít

### 5.2.3 Proctorova zkouška

Pomocí Proctorovy zkoušky zhutnění byla zjištěna optimální vlhkost popílku, při které má suchý popílek maximální objemovou hmotnost.



Obr. 17. Zkušební válec s nástavcem. Foto: M. Rochovanský, 2016



Graf č. 2: Výsledek Proctorovy zkoušky popílků

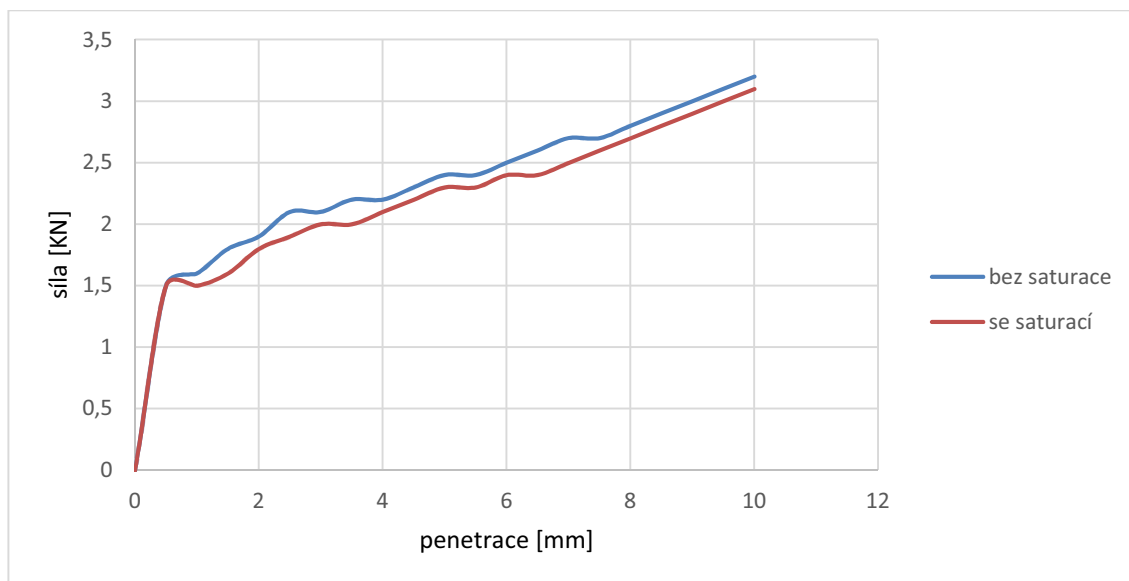
Optimální vlhkost mnou odebraného vzorku  $w_{opt} = 44,67 \%$ , Maximální objemová hmotnost  $\rho_{dmax} = 893,424 \text{ Kg. m}^{-3}$ . Hodnoty suché objemové hmotnosti a optimální vlhkosti závisí na zrnitostním složení materiálu. S rostoucím podílem jemných částic roste optimální vlhkost a zároveň klesá maximální suchá objemová hmotnost.

#### 5.2.4 Zkouška CBR

Pomocí zařízení CBR byly naměřeny hodnoty IBI, tj. okamžitý index únosnosti, který se provádí bez přetížení, zrání a saturace. Zkoušku IBI provádíme pro posouzení konstrukčních vrstev pro poježdění staveništní dopravy. Dále byly provedeny zkoušky CBR s přetížením a po zrání a saturaci, které jsou rozhodující.

Popílek			
IBI		CBR	
Penetrace [mm]	síla [KN]	Penetrace [mm]	síla [KN]
0	0	0	0
0,5	1,5	0,5	1,5
1	1,6	1	1,5
1,5	1,8	1,5	1,6
2	1,9	2	1,8
2,5	2,1	2,5	1,9
3	2,1	3	2
3,5	2,2	3,5	2
4	2,2	4	2,1
4,5	2,3	4,5	2,2
5	2,4	5	2,3
5,5	2,4	5,5	2,3
6	2,5	6	2,4
6,5	2,6	6,5	2,4
7	2,7	7	2,5
7,5	2,7	7,5	2,6
8	2,8	8	2,7
8,5	2,9	8,5	2,8
9	3	9	2,9
9,5	3,1	9,5	3
10	3,2	10	3,1

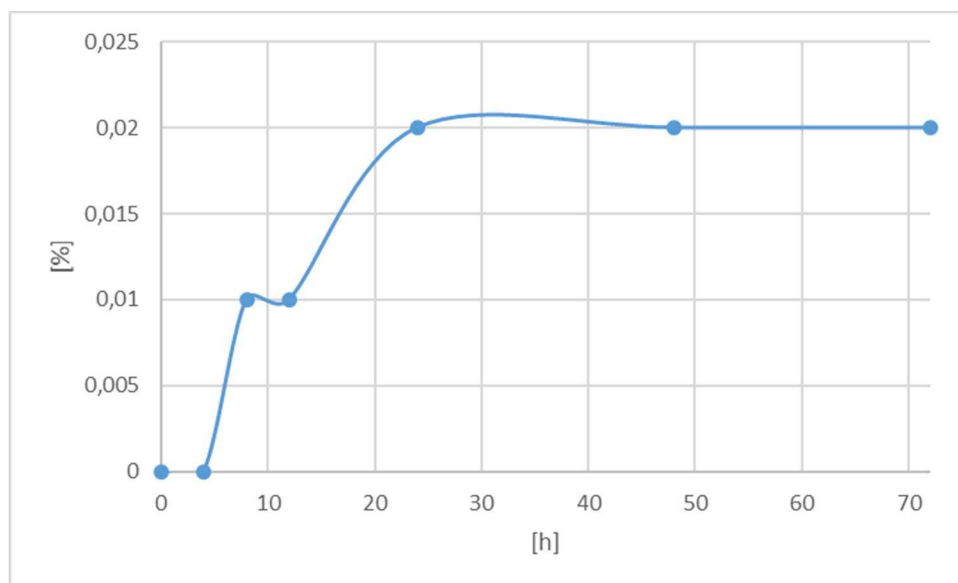
Tabulka č. 12: Průběh zkoušky CBR - Popílek



Graf č. 3: Průběh zkoušky CBR - Popílek

Naměřené hodnoty vyšly IBI = 15,91 %, CBR = 14,39 %, jedná se o poměrně kvalitní materiál do násypu, který splňuje limitní hodnoty CBR pro násyp 10 %. Popílek po dobu provádění zkoušky nevykazoval hydraulické vlastnosti.

### 5.2.5 Lineární bobtnání



Graf č. 4: Průběh objemových změn popílku

Zde došlo k potvrzení předpokladu, že objemové změny jsou minimální. Po 3 dnech zrání činil lineární nárůst pouze 0,02mm, tj. 0,017%.

### 5.2.6 Pórovitost

Ke zjištění pórovitosti popílku bylo nejprve nutno určit jeho měrnou hmotnost pomocí pyknometru. Zjištěná měrná hmotnost zkoušeného vzorku popílku činí  $\rho_s = 2138 \text{ kg.m}^{-3}$ . Na základě známé měrné a objemové hmotnosti popílku byla vypočtena jeho pórovitost  $n = 58,2 \%$ .

### 5.2.7 Analýza výluhů

Tato zkouška nebyla v diplomové práci řešena z důvodu nedostatečného vybavení laboratoře. Jedná se o velmi náročnou a nákladnou zkoušku, která by ve školních laboratořích neměla své opodstatnění. Bylo doporučeno vycházet z již provedené chemické analýzy firmou Arcadis CZ a.s., pro výzkum těchto popílků z roku 2015, pod vedením doc. RNDr. Františka Kresty. V tabulce lze vidět, že žádný z prvků nepřekročil limitní hodnotu. Dá se tedy konstatovat, že popílek z úložiště v Předmostí u Přerova je z hlediska vyluhovatelnosti těžkých kovů vhodným násypovým materiálem.

Prvek	Limitní obsah (mg.l <sup>-1</sup> )	44758	44759
		Předmostí	
Ag	0,1	< 0,005	< 0,005
As	0,1	0,018	< 0,010
Ba	1	0,022	0,024
Be	0,005	< 0,005	< 0,005
Pb	0,1	< 0,010	< 0,010
Cd	0,005	< 0,003	< 0,003
Cr-celk.	0,1	0,009	< 0,005
Co	0,1	< 0,010	< 0,010
Cu	1	< 0,010	< 0,010
Ni	0,1	< 0,006	< 0,006
Hg	0,005	< 0,0003	< 0,0003
Se	0,05	< 0,010	0,014
V	0,2	0,021	0,013
Zn	3	< 0,010	< 0,010
Sn	1	< 0,020	< 0,020

Tabulka č. 13: Analýza výluhu popílku [4]

## 5.3 Popílek jako pojivo

Pro ověření použití popílku jako pojiva byl odebrán vzorek spráše charakteru jílu se střední plasticitou, přímo z místa stavby dálnice D1 Přerov – Lipník nad Bečvou.

### 5.3.1 Zatřídění jílu

Byly provedeny zkoušky k určení Atterbergových mezí dle ČSN CEN ISO/TS 17892-12. Mez tekutosti  $w_l = 35,3 \%$ , Mez plasticity  $w_p = 22,2 \%$ , Index plasticity  $I_p = 13,1$ . Ze zjištěných hodnot je patrné, že se jedná o jíl se střední plasticitou F6CI. Optimální vlhkost zeminy byla  $w_{opt} = 16,36 \%$  při maximální suché objemové hmotnosti  $\rho_{dmax} = 1736,076 \text{ kg. m}^{-3}$ .

[7], [23]

### 5.3.2 Vytvoření směsí

Byly vytvořeny dvě směsi jílu s popínkem s cílem použít popílek jako pojivo ve smyslu normy ČSN EN 14227 – 15. První směs obsahovala 10 % popínku. Druhá směs obsahovala 15 % popínku. Směsi byly namíchány pomocí míchacího přístroje, za optimální vlhkosti zeminy.



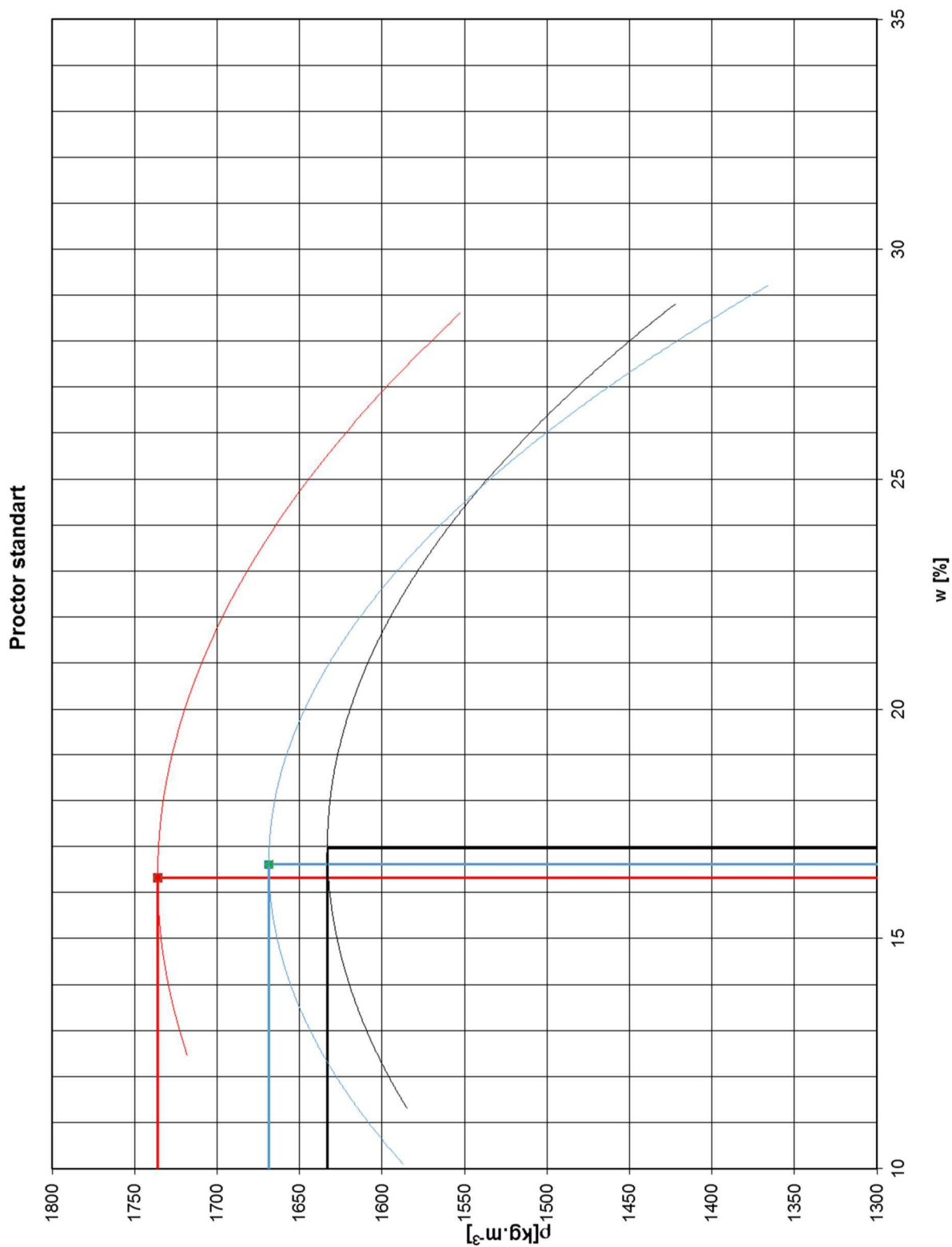
Obr. 18. Namíchaná směs jílu a popínku. Foto: M. Rochovanský, 2016

### 5.3.3 Proctor standard

U směsi s 10 % popínku byla zjištěna optimální vlhkost  $w_{opt} = 16,62 \%$  a její maximální suchá objemová hmotnost  $\rho_{dmax} = 1668,637 \text{ kg. m}^{-3}$ . U směsi s 15 % popínku činila  $w_{opt} = 16,97 \%$ ,  $\rho_{dmax} = 1633,1 \text{ kg. m}^{-3}$ . A u samostatného jílu byla zjištěna optimální vlhkost  $w_{opt} = 16,32\%$ , maximální suchá objemová hmotnost činila  $\rho_{dmax} = 1736,076 \text{ kg. m}^{-3}$ .

V grafu (graf č. 5) je patrná změna maximální suché objemové hmotnosti a optimální vlhkosti v závislosti na procentuálním podílu popínku ve směsi. Čím více bylo přidáno do

směsi popílku, tím byla nižší suchá objemová hmotnost a zároveň rostla optimální vlhkost směsi.



Graf č. 5: Výsledek Proctorovy zkoušky stabilizátu

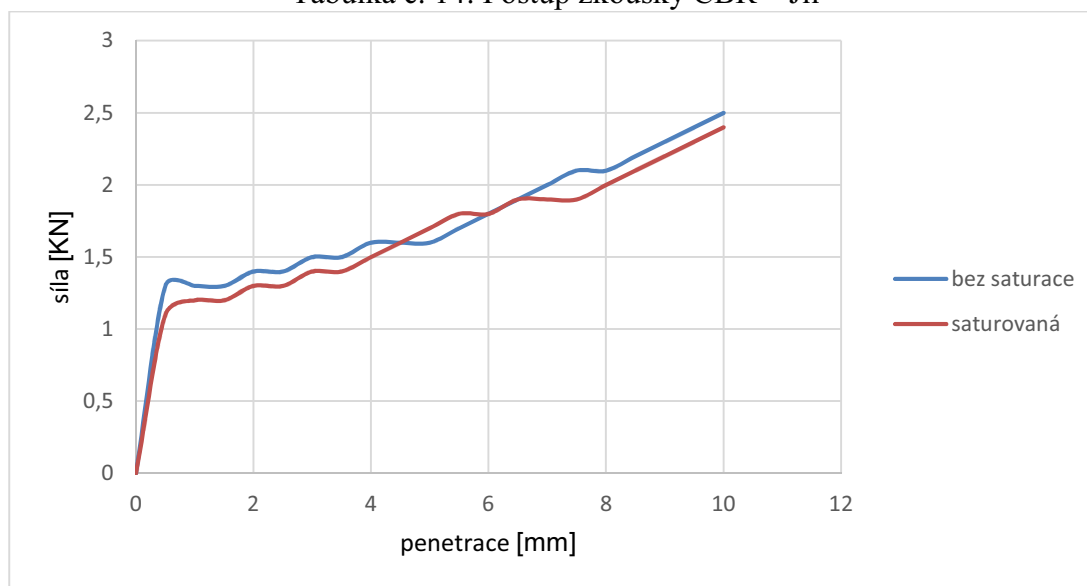


### 5.3.4 Zkouška CBR

U samotného jílu byla naměřena CBR bez saturace, IBI = 10,61 %, po saturaci CBR = 9,85 %.

Jíl (F6Cl)			
IBI		CBR	
penetrace[mm]	síla [kN]	penetrace[mm]	síla [kN]
0	0	0	0
0,5	1,3	0,5	1,1
1	1,3	1	1,2
1,5	1,3	1,5	1,2
2	1,4	2	1,3
2,5	1,4	2,5	1,3
3	1,5	3	1,4
3,5	1,5	3,5	1,4
4	1,6	4	1,5
4,5	1,6	4,5	1,6
5	1,6	5	1,7
5,5	1,7	5,5	1,8
6	1,8	6	1,8
6,5	1,9	6,5	1,9
7	2	7	1,9
7,5	2,1	7,5	1,9
8	2,1	8	2
8,5	2,2	8,5	2,1
9	2,3	9	2,2
9,5	2,4	9,5	2,3
10	2,5	10	2,4

Tabulka č. 14: Postup zkoušky CBR – Jíl

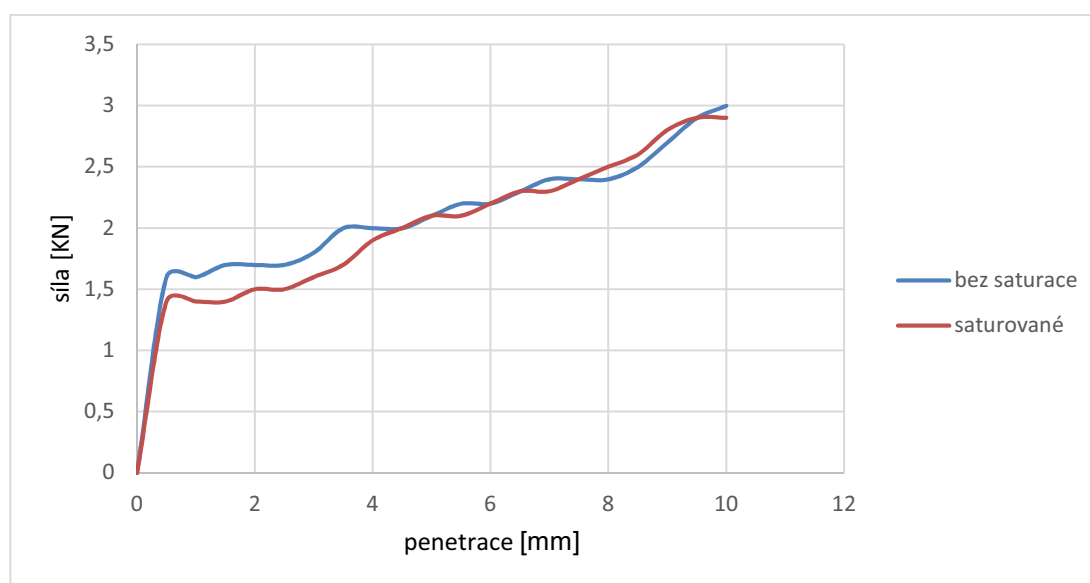


Graf č. 6: Průběh zkoušky CBR - Jíl

U směsi s 10 % popílku byla naměřena hodnota CBR bez saturace, IBI = 12,88%, po saturaci CBR = 11,36 %.

Jíl + 10 % popílku			
IBI		CBR	
penetrace[mm]	síla [kN]	penetrace[mm]	síla [kN]
0	0	0	0
0,5	1,6	0,5	1,4
1	1,6	1	1,4
1,5	1,7	1,5	1,4
2	1,7	2	1,5
2,5	1,7	2,5	1,5
3	1,8	3	1,6
3,5	2	3,5	1,7
4	2	4	1,9
4,5	2	4,5	2
5	2,1	5	2,1
5,5	2,2	5,5	2,1
6	2,2	6	2,2
6,5	2,3	6,5	2,3
7	2,4	7	2,3
7,5	2,4	7,5	2,4
8	2,4	8	2,5
8,5	2,5	8,5	2,6
9	2,7	9	2,8
9,5	2,9	9,5	2,9
10	3	10	2,9

Tabulka č. 15: Postup zkoušky CBR – Jíl + 10 % popílku

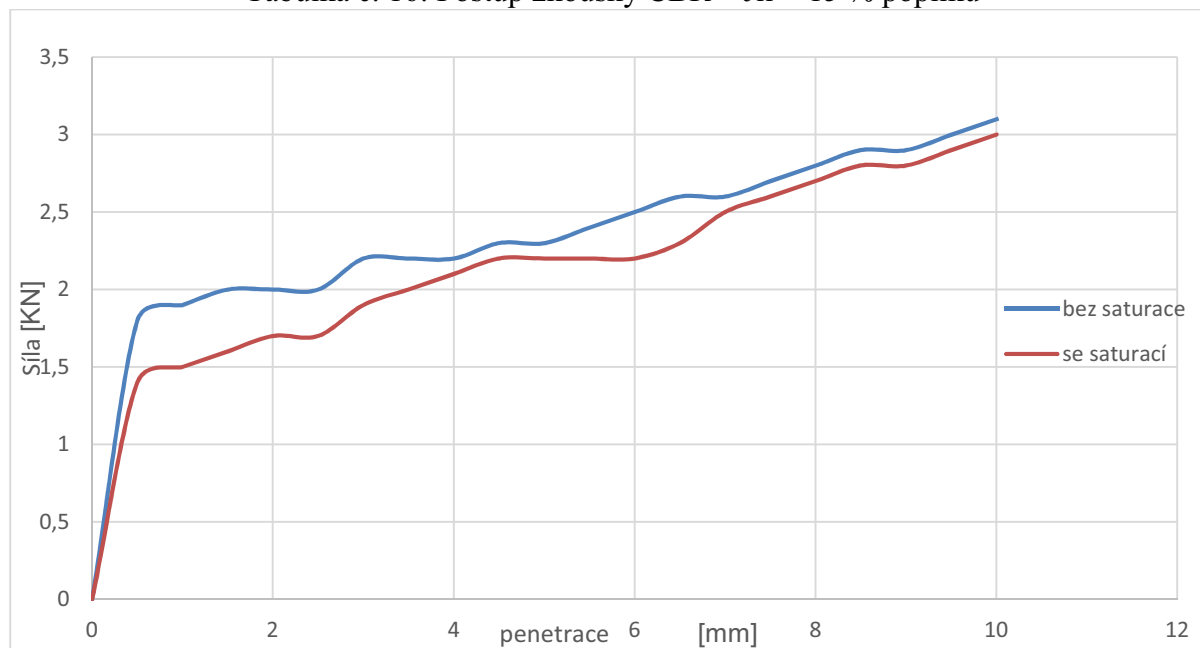


Graf č. 7.: Průběh zkoušky CBR – Jíl + 10 % popílku

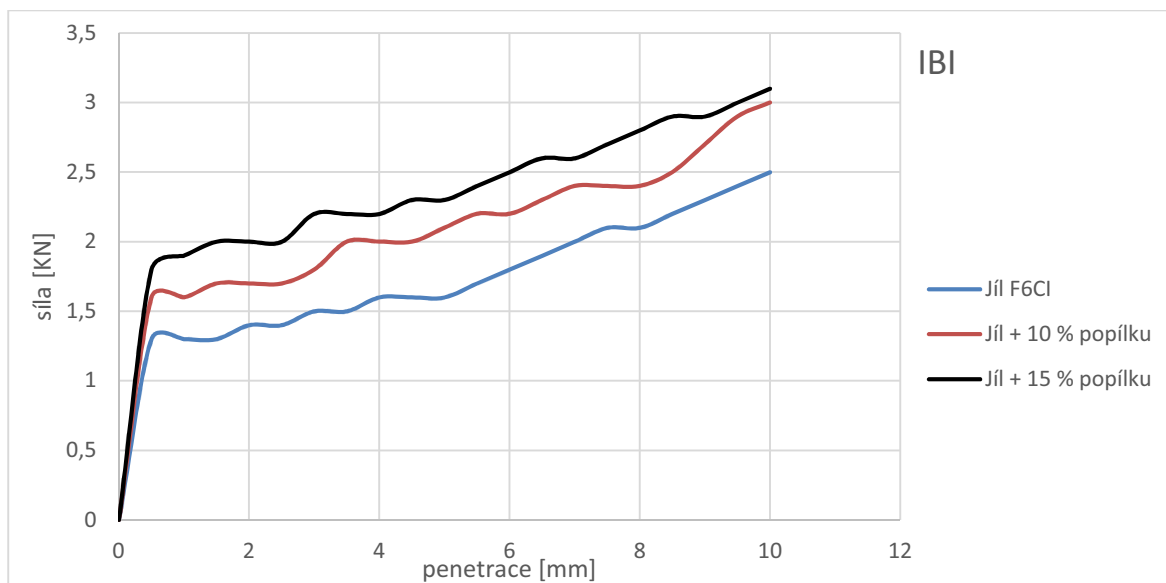
Směs s 15 % popílku měla CBR bez saturace, IBI = 15,15%, po saturaci CBR = 12,88 %.

Jíl + 15 % popílku			
IBI		CBR	
penetrace[mm]	síla [kN]	penetrace[mm]	síla [kN]
0	0	0	0
0,5	1,8	0,5	1,4
1	1,9	1	1,5
1,5	2	1,5	1,6
2	2	2	1,7
2,5	2	2,5	1,7
3	2,2	3	1,9
3,5	2,2	3,5	2
4	2,2	4	2,1
4,5	2,3	4,5	2,2
5	2,3	5	2,2
5,5	2,4	5,5	2,2
6	2,5	6	2,2
6,5	2,6	6,5	2,3
7	2,6	7	2,5
7,5	2,7	7,5	2,6
8	2,8	8	2,7
8,5	2,9	8,5	2,8
9	2,9	9	2,8
9,5	3	9,5	2,9
10	3,1	10	3

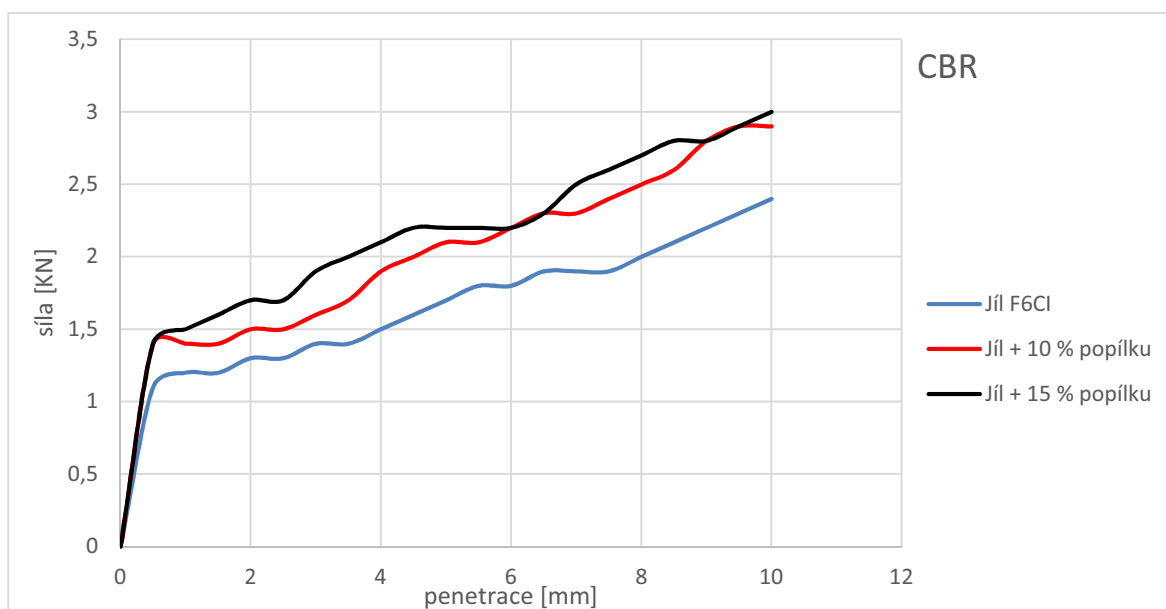
Tabulka č. 16: Postup zkoušky CBR – Jíl + 15 % popílku



Graf č. 8: Průběh zkoušky CBR - Jíl s 15% popílku



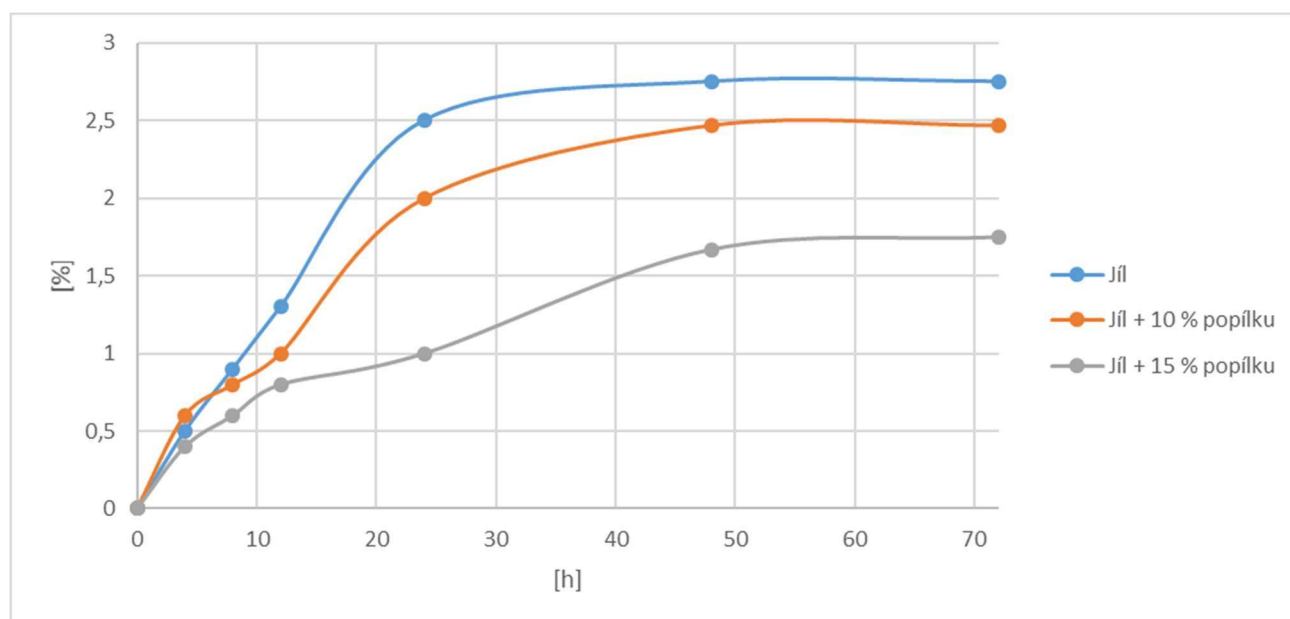
Graf č. 9: Průběh zkoušky IBI – Jíl, směsi popílku se zeminou



Graf č. 10: Průběh zkoušky CBR – Jíl, směsi popílku se zeminou

Z naměřených hodnot v grafu (graf č. 9 a graf č. 10) je patrné, že s rostoucím obsahem popílku ve směsi roste kalifornský poměr únosnosti a to jak u zkoušky CBR, tak i IBI. Přidáním vhodného množství popílku do jílu je možno příznivě ovlivnit vlastnosti jílu. Kalifornský poměr únosnosti (CBR) pro obě směsi splňuje požadavky TP 93.

### 5.3.5 Objemové změny



Graf č. 11: Průběh objemových změn

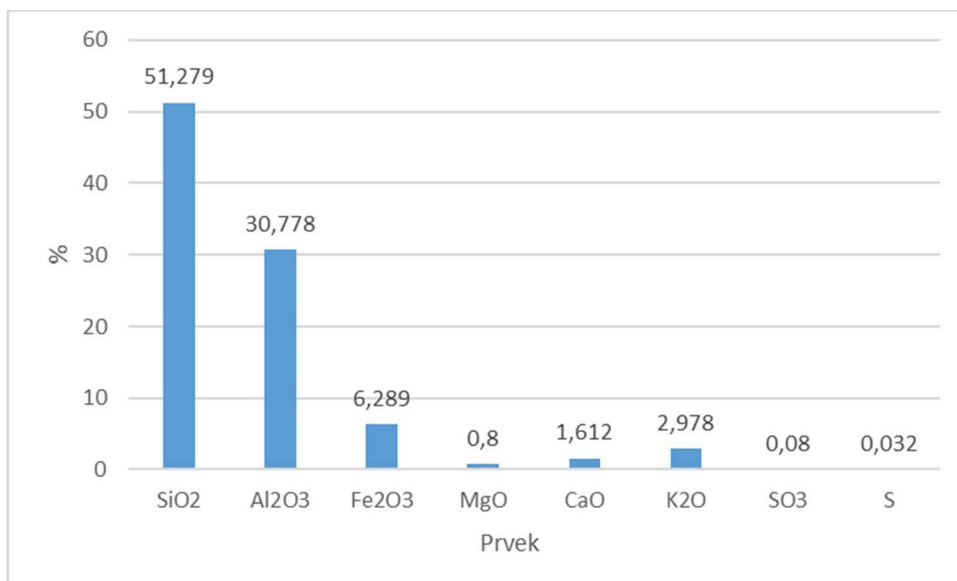
U čistého jílu byly změřeny objemové změny 2,75 %, směs s 10 % popílku 2,47 %, směs s 15 % popílku 1,75 %. Jak lze pozorovat v grafu (graf č. 11), tak s rostoucím množstvím popílku dochází ke zmenšení objemových změn. Vytvořením stabilizátu s vhodným množstvím popílku lze tedy i vhodně ovlivnit výsledné objemové změny.

## 5.4 Souhrn výsledků

Souhrn výsledků						
vzorek	$w_{opt}$ [%]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	IBI [%]	CBR [%]	n [%]	obj. změny [%]
popílek	44,67	893,424	15,91	14,39	58,2	0,02
jíl	16,32	1736,076	10,61	9,85	-	2,75
jíl + 10 % popílku	16,62	1668,637	12,88	11,36	-	2,47
jíl + 15 % popílku	16,97	1633,1	15,15	12,88	-	1,75

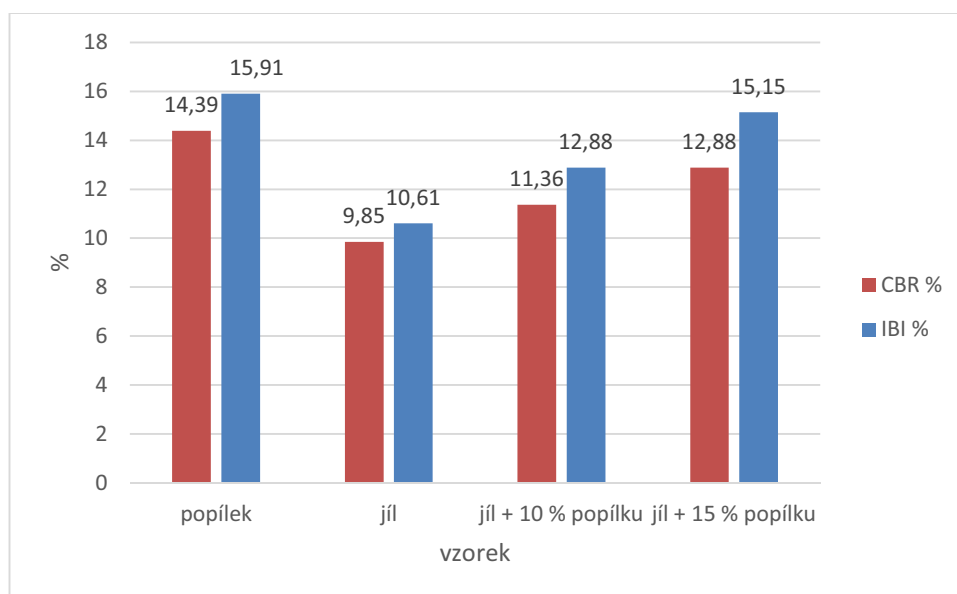
Tabulka č. 17: Souhrn výsledků

Pórovitost závisí na zrnitosti materiálu, čím je větší podíl jemné frakce, tj. <0,063 mm, tím větší je pórovitost materiálu.



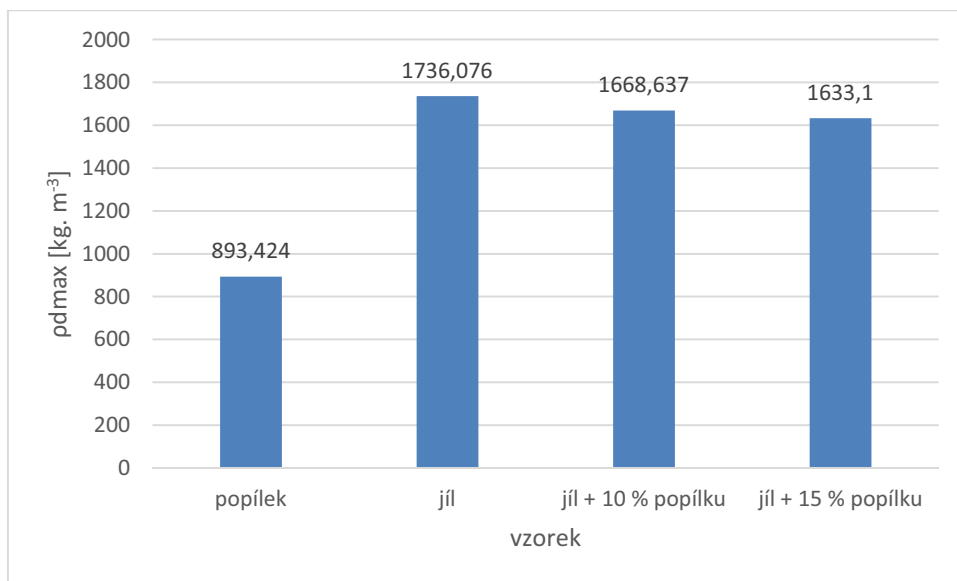
Graf č. 12: Chemické složení

Dle naměřených hodnot, lze klasifikovat popílek dle klasifikace ASTM C618, jako popílek kyselý (třídy F), s nízkým obsahem CaO.

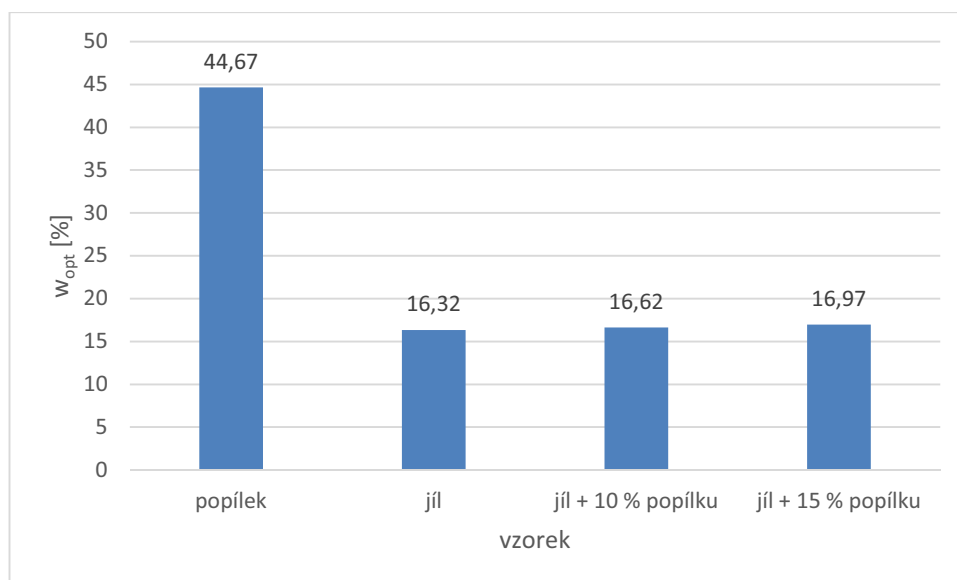


Graf č. 13: Souhrn výsledků CBR / IBI

Z výsledků zkoušek CBR lze usoudit, že popíłky v průběhu zkoušky nevykazovaly žádné hydraulické vlastnosti. Je možné, že hydraulické vlastnosti by se na těchto vzorcích projeví až po delší době.

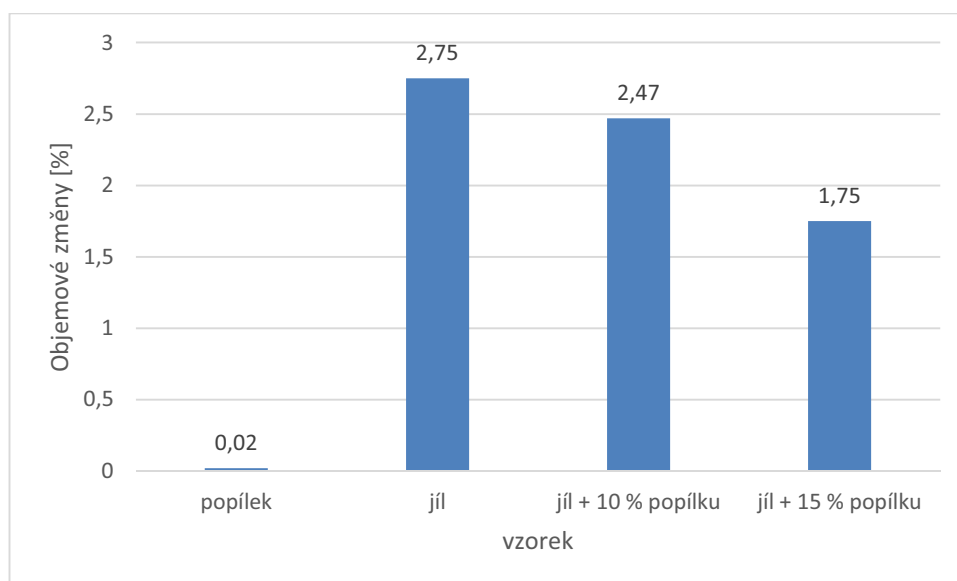


Graf č. 14: Maximální objemové hmotnosti suchých zemin



Graf č. 15: Optimální vlhkost zemin

Hodnoty suché objemové hmotnosti a optimální vlhkosti závisí na zrnitostním složení materiálu. S rostoucím podílem jemných částic roste optimální vlhkost a zároveň klesá maximální suchá objemová hmotnost.



Graf č. 16: Objemové změny zemin

Naměřené objemové změny jsou nízké. Nejedná se o změny v důsledku chemických reakcí. Lze konstatovat, že vyšším podílem popíłku ve směsi, klesají objemové změny.



## 6 Porovnání výsledků s technickými předpisy

### 6.1 Porovnání s TP 93

Technický předpis 93 uvádí, že minimální hodnota CBR po zrání je 10 %, maximální povolená pórovitost materiálu je 60%. Maximální objemové změny jsou 3 %.

#### **Popílek jako násypový materiál:**

- CBR = 15,15 %, pórovitost tohoto materiálu byla 58,2 %. Objemové změny zde byly minimální a činily 0,02 %.

Výsledky potvrzují, že popílek vyhovuje všem kritériím dle TP 93.

#### **Popílek jako ve směsi se zeminou:**

- u desetiprocentní směsi bylo CBR = 11,36 %, objemové změny byly 2,47 %.
- u patnáctiprocentní směsi bylo CBR = 12,88 %, objemové změny byly 1,75 %.

Popílek ve směsi se zeminou splnil veškerá kritéria, která byla udána tímto předpisem, avšak došlo pouze k mechanické úpravě vlastností zemin.

### 6.2 Porovnání výsledků s německým předpisem

Německý předpis Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau, TL BuB E-StB 07 (Technical Delivery Specifications for Soils and Building Materials for Earthworks in Road Construction). Uvádí požadavky na zrnitost, vlhkost popílku a ztrátu žíháním.

#### **Zrnitost popílku musí splňovat:**

- |                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| - $d \leq 0,020 \text{ mm}$ | max. 70 M.-% |
| $D \leq 0,063 \text{ mm}$   | 60 – 95 M.-% |
| $d \leq 0,63 \text{ mm}$    | 100 M.-%     |

#### **Vlhkost:**

- Vlhkost se musí pohybovat v rozpětí 97 – 100 % zhutnění dle Proctora (PS) pro příslušný popílek.

#### **Ztráta žíháním:**

- Ztráta žíháním nesmí překročit 15 %.

Popílek z Předmostí u Přerova splňuje kritéria zrnitosti. Ztráta žíháním nebyla v této diplomové práci řešena, protože nemá pro násypové konstrukce opodstatnění.

[24]

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit fyzikálně - mechanické vlastnosti popílku, porovnat je s technickým předpisem TP 93. Další cíl bylo vytvořit směsi popílku se zeminou, použít popílek jako pojivo ve smyslu normy ČSN EN 14227 – 15, zjistit fyzikálně – mechanické vlastnosti směsí následně je porovnat s TP93 a ověřit, zda se u směsí projeví hydraulické vlastnosti popílku.

Výsledky průkazných zkoušek popílků odebraných v deponii Předmostí, potvrdily jejich vhodnost využití jako násypového materiálu. Popílký splnily všechna kritéria udávaná technickým předpisem TP 93. Maximální suchá objemová hmotnost popílku byla  $\rho_{dmax} = 893,424 \text{ kg. m}^{-3}$ , Optimální vlhkost  $w_{opt} = 44,67 \%$ , pórovitost popílků  $n = 44,46 \%$ , kalifornský poměr únosnosti  $CBR = 14,39 \%$ .

Rovněž bylo ověřeno, že popílek odebraný v deponii Předmostí by vyhověl i Německým předpisům a i dle nich by mohl být použit jako násypový materiál.

Zkouškami bylo také zjištěno, jak množství přidaného popílku do zeminy odebrané ze stavby dálnice D1, úsek Přerov – Lipník nad Bečvou ovlivňuje její výsledné vlastnosti. Zemina byla smíchána s 10 % a 15 % popílku jako pojiva. Se zvyšujícím se množstvím přidaného popílku do směsi došlo ke zvýšení kalifornského poměru únosnosti. Dále došlo ke snížení maximální suché objemové hmotnosti připravených směsí a také ke snížení jejich optimální vlhkosti. Přídavek popílku do zeminy pozitivně ovlivnil objemové změny zeminy, s vyšším obsahem popílku došlo k jejich zmenšení. Využití popílku jako pojiva tedy je možné. Připravené směsi také splnily veškerá kritéria daná technickým předpisem TP 93. V průběhu zkoušek došlo pouze k mechanickému zlepšení materiálu. Hydraulické vlastnosti se za dobu vykonávání zkoušek neprojevily. Pro docílení hydraulického chování popílku doporučuji jeho mísení s vápnem.

Ověření, zda se vlastnosti popílků mění v závislosti na hloubce a místě uložení, nemohlo být provedeno, z důvodu velkého zpoždění prací při výstavbě. Na stavbě se vyskytl problém s přeložkou veřejných sítí, bohužel se s výstavbou v Předmostí stále nepokračuje.

**Poděkování:**

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Dr. Ing. Hynkovi Lahutovi, za odbornou pomoc a ochotu, kterou mi věnoval při vypracování této diplomové práce. Zároveň chci poděkovat i doc. RNDr. Františku Krestovi PhD, za odbornou konzultaci mých výsledků. Musím také poděkovat firmě TPA pobočka Velká Bystřice, která mi poskytla vybavení jejich laboratoře k provedení zkoušek.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] FEČKO, Peter. *Popílky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0327-5.
- [2] *Strojirenstvi studentske: Parní generátory - Ohniště na pevná paliva* [online]. [cit. 2016-10-16]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz>
- [3] KRESTA, František. *Druhotné suroviny v dopravním stavitelství: Secondary materials in highway engineering*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2890-9.
- [4] KRESTA, František. *Popílky z úložišť Předmostí a Prosenice – potenciální zdroj materiálu pro stavbu dálnice D1 v úseku Přerov – Lipník nad Bečvou*. Konference Popílky ve stavebnictví 2015. Brno, 2012. ISBN 978-80-214-5192-6
- [5] TP 93 - *Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2011. 31s.
- [6] ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: *Navrhování geotechnických konstrukcí – Část1: Obecná pravidla*
- [7] ČSN 73 6133. *Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*.
- [8] TP 94 - *Úprava zemin*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2013. 52s
- [9] Veolia [online]. [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: <http://www.vecr.cz>
- [10] MEIXNER, Marek *Návrh úpravy kotle K2 v Teplárně Přerov pro zvýšení teploty přehřáté páry*. Ostrava 2014. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/104725>. Diplomová práce. VŠB – TUO. Vedoucí Práce doc. Dr. Ing. Bohumír Čech.

- [11] TKP 4. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací*. Kapitola 4: Zemní práce Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2009. 32s
- [12] SHERWOOD, P. T. *Alternative materials in road construction: a guide to the use of recycled and secondary aggregates*. 2nd ed. London: Thomas Telford, 2001. ISBN 0-7277-3031-2.
- [13] SEAR, L. K. A. *Properties and use of coal fly ash*. Thomas Telford Publishing. London, 2001. ISBN 0-7277-3031-2
- [14] HERLE, Vítězslav. *Geotechnika – Zemní práce, klasifikace, úprava zemin, zářezy, násypy, speciální zakládání*. Oprávnění k výkonu stavebního dozoru na stavbách PK. Seminář 27 března 2012
- [15] *Geotechnika* [online]. [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/>
- [16] Návod k laboratorním cvičením z mechaniky hornin a zemin. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~moh050/mechanika\\_hornin\\_a\\_zemin/navody%20laboratore.pdf](http://homel.vsb.cz/~moh050/mechanika_hornin_a_zemin/navody%20laboratore.pdf)
- [17] ČSN EN 12457-1. *Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů*. 1 - 4 část.
- [18] ČSN CEN ISO/TS 17892-4 (721007). *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*.
- [19] ČSN EN 13286-2 (736185). *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška*.
- [20] ČSN 72 1010. *Stanovení objemové hmotnosti zemin. Laboratorní a polní metody*.
- [21] ČSN EN 13286 – 47 (736185). *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*.

- [22] EN ISO 14688-1, 2. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 1: Pojmenování a popis, Část 2: Zásady pro zařídování*
  
- [23] ČSN CEN ISO/TS 17892-12. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení konzistenčních mezí.*
  
- [24] TL BuB E-StB 07. *Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau, (Technical Delivery Specifications for Soils and Building Materials for Earthworks in Road Construction).*

## 9 Seznam obrázků, grafů a tabulek

### Seznam obrázků:

Obr. 1. Roštové ohniště s pásovým roštem	[2]
Obr. 2. Práškové ohniště	[2]
Obr. 3. Fuidní ohniště	[2]
Obr. 4. Druhotné využití křemičitých popílků ve stavebnictví, Velká Británie 2004	[3]
Obr. 5. Postup ukládání popílků v násypech	[14]
Obr. 6. Základní průkazní zkoušky dle TP 93	[5]
Obr. 7. Prosévací přístroj	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 8. Výsledek proctorovy zkoušky – Gaussova křivka	[16]
Obr. 9. Proctorův přístroj	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 10. Pyknometr	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 11. Přístroj CBR	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 12. Zkušební válec s připevněným úchylkoměrem	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 13. Odebraný popílek	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 14. Místo odběru vzorků popílku	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 15. Vyznačená poloha úložiště na mapě	
Obr. 16. Teplárna Přerov	[9]
Obr. 17. Zkušební válec s nástavcem	Foto: M. Rochovanský, 2016
Obr. 18. Namíchaná směs jílu a popílku	Foto: M. Rochovanský, 2016

### Seznam grafů:

Graf č. 1. Křivka zrnitosti popílku
Graf č. 2. Výsledek Proctorovy zkoušky popílků
Graf č. 3. Průběh zkoušky CBR – Popílek
Graf č. 4: Průběh objemových změn popílku
Graf č. 5. Výsledek Proctorovy zkoušky stabilizátu
Graf č. 6. Průběh zkoušky CBR - Jíl
Graf č. 7. Průběh zkoušky CBR – Jíl + 10 % popílku
Graf č. 8. Průběh zkoušky CBR – Jíl + 15 % popílku
Graf č. 9: Průběh zkoušky IBI – Jíl, směsi popílku se zeminou
Graf č. 10: Průběh zkoušky CBR – Jíl, směsi popílku se zeminou
Graf č. 11: Průběh objemových změn

Graf č. 12: Chemické složení

Graf č. 13: Souhrn výsledků CBR / IBI

Graf č. 14. Maximální objemové hmotnosti suchých zemin

Graf č. 15. Optimální vlhkost zemin

Graf č. 16. Objemové změny zemin

### **Seznam tabulek:**

Tabulka č. 1. Mezinárodní klasifikační systém	[1]
Tabulka č. 2. Klasifikace dle ASTM C 618	[1]
Tabulka č. 3. Klasifikace dle CSA. A23	[1]
Tabulka č. 4. Klasifikace dle zdroje spalovaného uhlí	[1]
Tabulka č. 5. Klasifikace na základě obsahu CaO	[1]
Tabulka č. 6. Klasifikace dle vápenného indexu	[1]
Tabulka č. 7. Navrhovaná klasifikace popílků	[1]
Tabulka č. 8. Limitní hodnoty výluhu dle TP 93	[5]
Tabulka č. 9. Základní parametry spalovacích jednotek	[9]]
Tabulka č. 10. Chemické složení popílku	
Tabulka č. 11. Propady jednotlivých sít	
Tabulka č. 12. Postup zkoušky CBR- Popílek	
Tabulka č. 13. Analýza výluhu popílku	[4]
Tabulka č. 14. Postup zkoušky CBR – Jíl	
Tabulka č. 15. Postup zkoušky CBR – Jíl + 10 % popílku	
Tabulka č. 16. Postup zkoušky CBR – Jíl + 15 % popílku	
Tabulka č. 17. Souhrn výsledků	